JARDINES BOTANICOS Y PARQUES ZOOLOGICOS DE TIEMPOS REMOTOS

INVESTIGACION y CIENCIA

SEPTIEMBRE 1999
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Materias primas de la vida

El misterioso espín de los nucleones

Vacunas genéticas

Informe especial:
futuro de las pilas de combustible

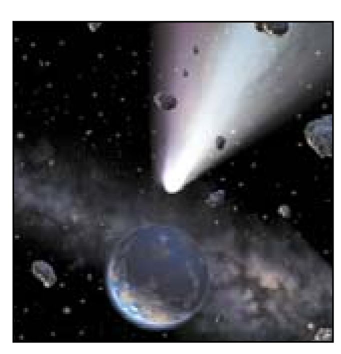
00276
9 770210 136004



Septiembre de 1999 Número 276

SECCIONES

SECCIONES



Portada: Alfred T. Kamajian

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Slim Films
6	Slim Films (*fondo*), John P. Bradley (*fotografía*)
7	Jeff Hester, Paul Scowen y NASA (*arriba*), Slim Films (*abajo*)
8	Slim Films
9	Laboratorio de Propulsión a Chorro/NASA
10	David W. Deamer (*izquierda* y *arriba a la derecha*), Slim Films (*abajo a la derecha*)
11	Slim Films
14-16	Dana Burns-Pizer
17	Velpandi Ayyavoo
18-19	Dana Burns-Pizer
20	Michael Chattergoon
21	Heidi Noland
24-26	Slim Films
27	Slim Films; Heike Thum-Schmielau *DESY* (*fotografía*)
28-29	Laurie Grace
45	Museo Británico
46-47	Museo Egipcio de Berlín; fotografía de Jürgen Liepe (*izquierda*), Rogers Fund y Edward S. Harkness Gift, 1920 (20.3.13), fotografía ©1992 Museo de Arte Metropolitano (*derecha*); Laurie Grace (*mapa*)
48	Archivos Werner Forman/Art Resource
49-51	Museo Británico
52-53	George Retseck (*dibujo*), Instituto Fraunhofer para Solar Energy Systems (*arriba a la izquierda*), Daimler-Benz (*abajo a la izquierda*), Plug Power (*derecha*)
55	George Retseck, fuente: DaimlerChrysler
56	Karl Kordesch
57	Ballard Power Systems
58	Richard Hunt
59	George Retseck
61	George Retseck
62	Jock Pottle, cortesía de Fox & Fowle Architects
63	Richard Hunt
64	Cortesía de Plug Power
67-69	George Retseck
73-81	Material gráfico elaborado por Gabriel Pérez Díaz (IAC), imágenes procesadas por Fernando de Pablos Caño (IAC)
82-83	Daniels & Daniels
85	Bryan Christie
86	Bryan Christie; diseño cortesía de Rosemary Grazebrook
87	Bryan Christie
88	Dusan Petricic
96	Slim Films/Bryan Christie

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Carlos Rodriguez Rubio: *Materias primas de la vida*; Ana M.ª Rubio: *Vacunas genéticas*; Néstor Herrán: *El misterioso espín de los nucleones*; Victoria Laporta: *Jardines botánicos y parques zoológicos de tiempos remotos*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

Ciencia y sociedad:

Ana M.ª Rubio: *El origen africano de la humanidad ¿una teoría anticuada?*; Manuel Puigcerver: *Chapoteos* y *Magia perforada*; Luis Bou: *Fractales útiles*; Joandomènec Ros: *Comer tierra para vivir sano*; José M. García de la Mora: *Fervores cristianos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette, *Editors;* Graham P. Collins; Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION William Sherman
CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.150 pta.	20.700 pta.
	67,01 euro	124,41 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD
GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

TELEVISIÓN Y FAMILIA. «Los parpadeos de las pantallas de los televisores han inmovilizado en sus butacas a las familias de casi dos millones de hogares norteamericanos. Evidentemente ya es hora de que alguien comience a medir las repercusiones de esa nueva fuerza social. La Agencia de Radiodifusión y la Universidad de Rutgers han probado documentalmente que el efecto más potente de la televisión lo reciben los más jóvenes, que pasan dos horas cada tarde ante el receptor por término medio. El descubrimiento más sorprendente ha sido la dependencia entre el apego a la televisión y el grupo social: las familias de escasa educación pierden el interés por los programas televisivos antes que las más educadas.»

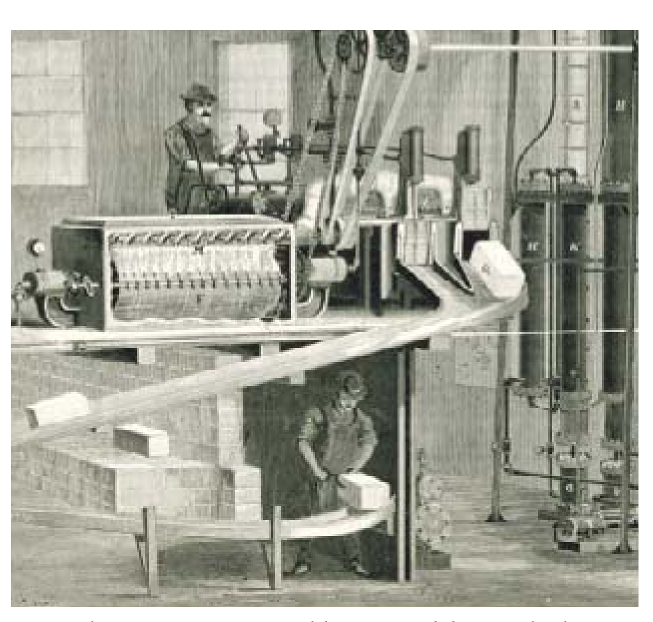
ENCEFALITIS. «Si nuestras hipótesis actuales son correctas, las enfermedades encefalíticas del hombre y de los caballos puede que representen el más complejo de los ciclos morbosos hasta ahora desentrañados. Es posible que el reservorio del virus de la encefalitis equina occidental sean los ácaros, que lo pasan a sus crías y a los pájaros. En el ciclo endémico principal el virus se propaga entre los pájaros y los mosquitos *Culex*. En el posible ciclo epidémico se infectan hombres y caballos, los cuales transmiten el virus a través del mosquito *Aëdes*.»

...cien años

MINERÍA AURÍFERA PROFUNDA. «No cabe la menor duda de que los yacimientos auríferos del Rand, en Sudáfrica, se adentran en las profundidades hasta más allá del punto en que las elevadas temperaturas imposibilitarán las operaciones mineras. ¿Dónde es probable que se halle tal límite? Experimentalmente se ha descubierto un aumento de temperatura de casi tres grados Celsius por cada cien de metros de profundidad vertical. Si suponemos que la máxima temperatura del aire a la que hombres y niños pueden desempeñar un turno de trabajo es de unos 38 ºC, resulta que la temperatura limita la profundidad de trabajo a unos 3500 metros.»

CARTAGO. «Las excavaciones de M. Gauckler en la antigua ciudad de Cartago, bajo una casa romana datada en los tiempos de Constantino, han puesto al descubierto un templo pagano. En una esquina retirada del vestíbulo se halló adherida al muro una gran lápida de mármol con una dedicatoria a Júpiter Amón, identificado con la deidad silvana a la que adoraban los bárbaros. Al pie de esa dedicatoria hay una figura votiva en mármol blanco que representa una cabeza de toro que porta entre sus cuernos una media luna con una inscripción dirigida a Saturno y una veintena de bétulos (piedras meteóricas sagradas) y bolas de piedra de carácter votivo.»

FABRICACION DE HIELO. «Por gentileza de D. L. Holden, que ha estado relacionado con la manufactura de hielo artificial durante más de treinta años, y quien con justicia podría ser llamado padre de esa industria, ilustramos una planta de notable interés. En el corazón de este nuevo sistema hay una fina película de amoníaco en evaporación dentro de un cilindro (F), que hace congelarse con gran rapidez al agua del exterior. Pero con la misma rapidez a la que el hielo se forma, éste es troceado mediante un conjunto de cuchillas dispuestas sobre un árbol. El lodo de virutas de hielo es apartado del cilindro por un tornillo sinfín (M) e introducido en las dos prensas hidráulicas que se ven en el grabado, donde es congelado para formar hielo compacto (Q).»



El nuevo sistema Holden para fabricar hielo

...ciento cincuenta años

AHORRO DE AGUA. «Una dama americana que escribe desde París afirma haber descubierto hace poco el secreto de los hermosos y luminosos cutis que se ven en esa ciudad. Parece ser que las damas francesas consideran al agua como una gran destructora de la piel, por lo que a menos que alguna circunstancia adversa les manche realmente la cara, excluyen por completo el agua de sus tocadores y se contentan con frotarse suavemente con una toalla basta y seca.»

RÉPLICAS VITALES. «En la sesión anual de la American Scientific Association, celebrada en la antigua Universidad de Harvard, el famoso profesor Agassiz subrayó que 'encontramos que los animales jóvenes, de casi toda clase, difieren mucho dentro del huevo de lo que son en su estado de crecimiento cumplido. Hallamos, asimismo, que el joven murciélago, o el pájaro, o la joven serpiente, en ciertos períodos de su crecimiento, se asemejan unos a otros hasta el punto de que es difícil decir cuál sea uno u otro, es decir, es difícil distinguir entre un murciélago y una serpiente'.»



Materias primas de la vida

Puede que la vida deba sus inicios a complicadas moléculas orgánicas elaboradas en los corazones helados de las nubes interestelares

Max P. Bernstein, Scott A. Sandford y Louis J. Allamandola



Los cometas se han considerado durante milenios ominosos augurios para la humanidad. Los astrónomos chinos habían bosquejado 29 variedades de cometas hacia el 400 a.C.; muchas de ellas vaticinaban calamidades. La suposición aristotélica de que los cometas eran un aviso de los dioses se mantuvo vigente en la civilización occidental durante los dos milenios siguientes al apogeo de la cultura griega antigua. Cometas y meteoritos siguen siendo en la actualidad protagonistas de historias cinematográficas de catástrofe y destrucción. Y resulta que la amenaza cometaria no es meramente mitológica. La ciencia moderna ha revelado que a buen seguro una colisión gigante de este tipo fue la que acabó con los dinosaurios y la humanidad contempló impresionada cómo el cometa Shoemaker-Levy 9 se estrellaba contra Júpiter en 1994.

Tan ominosa reputación se torna irónica cuando se considera la posibilidad de que fuese precisamente el difuso polvo espacial la causa de que la Tierra se convirtiese en el planeta acogedor y lleno de vida que es actualmente. Las investigaciones espaciales realizadas desde el inicio de los años sesenta plantearon la hipótesis de que fuesen los cometas y otros residuos de la formación del sistema solar los que recogieran las moléculas de gas y de agua que acabaron por proporcionar la atmósfera y los océanos que convierten el planeta en habitable.

Crece el número de investigadores que piensa que algunas de las materias primas importantes para la creación de vida vagaron por el espacio. Nuestro grupo del Laboratorio de Astroquímica del Centro de Investigación Nacional de Aeronáutica y Administración Espacial (NASA) Ames es de esta opinión. Algunas de estas moléculas orgánicas extraterrestres formarían cápsulas no estancas que pudieron albergar los primeros procesos celulares. Puede que ciertas moléculas absorbieran parte de la radiación ultravioleta solar, resguardando así a otras menos resistentes, y ayudaran a convertir la energía lumínica en sustancia química.

1. MOLECULAS ORGANICAS COMPLEJAS —algunas como las que se encuentran en los seres vivos— abundan en las partes oscuras de las nubes interestelares. Hace más de 4000 millones de años una de estas nubes se condensó en una vorágine que diseminó el Sol y los planetas. Algunas de las frágiles moléculas resistieron el calor violento de la formación del sistema solar al mantenerse en los confines fríos del conjunto, agrupadas en forma de cometas. Los cometas y otros residuos nebulares aportaron posteriormente estas moléculas a la Tierra.

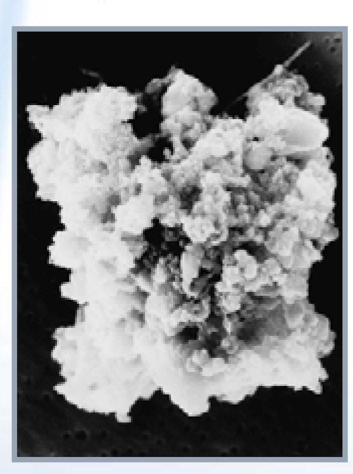
ASTEROIDES

COMETA

POLVO

METEORITO

2. COMETAS Y ASTEROIDES bombardearon con intensidad la Tierra hasta hace unos 4000 millones de años. Incluso ahora, nuestro planeta sigue recogiendo cientos de toneladas de polvo y de meteoritos procedentes de ellos cada día. En muchas partículas de polvo (*fotografía*) —la mayoría de tan sólo una milésima de milímetro de tamaño—abundan las moléculas orgánicas fabricadas en la nube oscura de la que surgió el sistema solar. Es probable que los huecos de la partícula inferior contuvieran hielo, que se evaporó cuando escapó de su cometa de origen.



PARTICULA DE POLVO

En estas circunstancias, la plataforma para la vida se formó hace más de 4000 millones de años cuando una nube interestelar fría y oscura se condensó en una vorágine de polvo y gas ardiente que engendró nuestro sistema solar. La Tierra se moldeó no mucho después que el Sol, hace unos 4500 millones de años, y se pensó durante mucho tiempo que había retenido agua y los ingredientes para la vida desde entonces. Pero actualmente se sospecha que inicialmente la Tierra estaba caliente y era seca y estéril. Ahora está claro que las partículas espaciales bombardearon el planeta joven y crearon cataclismos equivalentes a la detonación de incontables bombas atómicas. Es posible incluso que la Luna sea un trozo de la Tierra desprendido por la colisión de un objeto del tamaño de Marte [*véase* "El legado científico del proyecto Apolo", G. Jeffrey Taylor; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre, 1994]. Impactos de este tipo, comunes hasta hace unos 4000 millones de años, malograron a buen seguro cualquier vida bisoña que tratase de existir previamente.

Mientras que nuevas investigaciones adelantan la época en que el planeta se hizo habitable, otros descubrimientos atrasan la de los primeros signos de vida. El descubrimiento de microfósiles en rocas antiguas de Australia y de Africa del Sur demuestra que la vida terrestre ya era abundante hace unos 3500 millones de años. Rocas todavía más antiguas de Groenlandia, de 3900 millones de años de antigüedad, contienen rastros de isótopos de carbono que tan sólo pueden haber pertenecido a un organismo vivo. Dicho de otro modo, tan sólo unos 100 millones de años después del momento más remoto en que la Tierra pudo haber sustentado vida, había ya una presencia orgánica suficiente para que actualmente se conserven testimonios suyos. El escaso tiempo disponible para la emergencia de la vida implica el posible concurso de moléculas procedentes del espacio.

Los orígenes de los orígenes

El primer organismo unicelular del planeta es probable que debiera su aparición a una serie de reacciones químicas que originaran moléculas carbonadas del tipo de los aminoácidos. En condiciones adecuadas, los aminoácidos se concatenan para formar proteínas, que son los ladrillos de la vida. Stanley L. Miller, mientras estudiaba en el laboratorio de Harold C. Urey en la Universidad de Chicago a principios de los años cincuenta, fue uno de los primeros en mostrar cómo se debieron originar estos aminoácidos originarios. Hizo saltar chispas parecidas a los rayos a través de una "atmósfera" de moléculas sencillas en las que abundaba el hidrógeno y que estaban encerradas en un matraz de vidrio. Pasadas unas pocas semanas, la reacción produjo una serie de moléculas orgánicas —entre ellas aminoácidos— en un segundo matraz situado debajo y que simulaba las aguas oceánicas.

Datos posteriores han puesto en tela de juicio los componentes de la atmósfera de Miller, pero su teoría de la sopa primordial como mecanismo por el que se generaron los ingredientes de la vida en una charca caliente o en un océano de la superficie de la Tierra tiene todavía partidarios enfervorizados. Hay investigadores que han trasladado la olla de la sopa al fondo del mar, donde dicen que nubes lóbregas de minerales expulsadas por manantiales termales pudieran haber generado las moléculas precursoras de la vida. Pero crece el número de quienes buscan

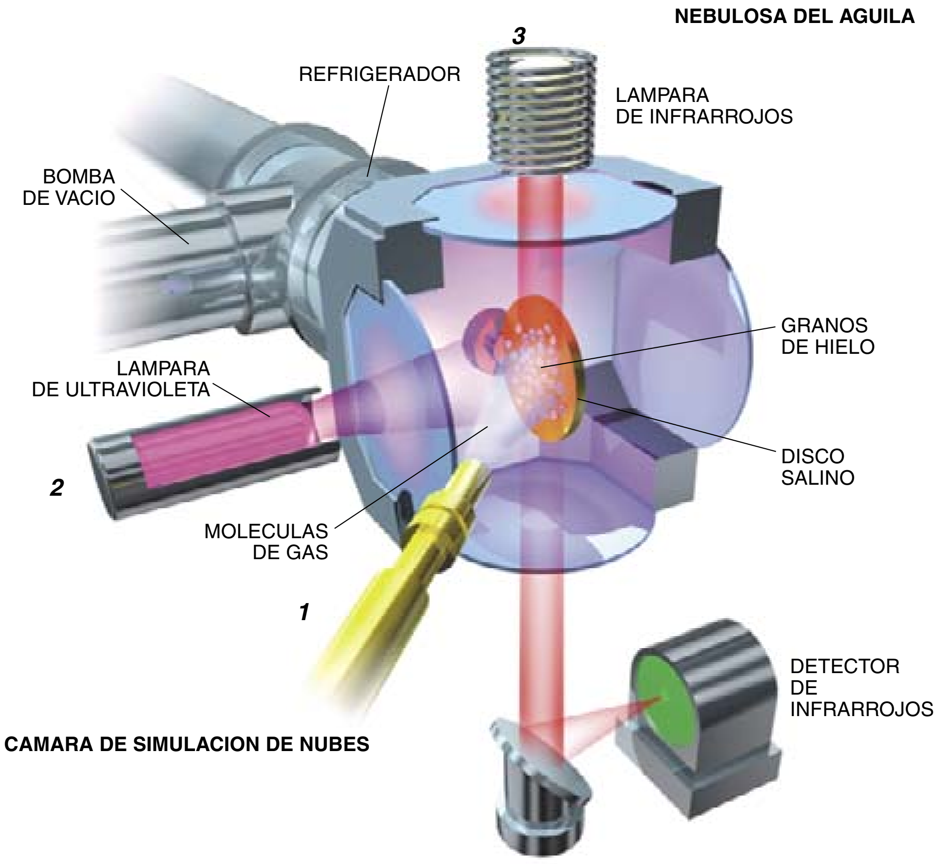
el origen de las moléculas portadoras de vida en un sitio completamente diferente, en el espacio.

Juan Oró propuso la idea del origen extraterrestre en 1961, teoría que fue reavivada por Sherwood Chang en 1979. Christopher R. Chyba, del Instituto de Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre (SETI) en Mountain View, California, es desde 1990 el paladín de la idea de que cometas pequeños, meteoritos y partículas de polvo interplanetario transportaron el agua y los gases atmosféricos que tiene el planeta desde el espacio.

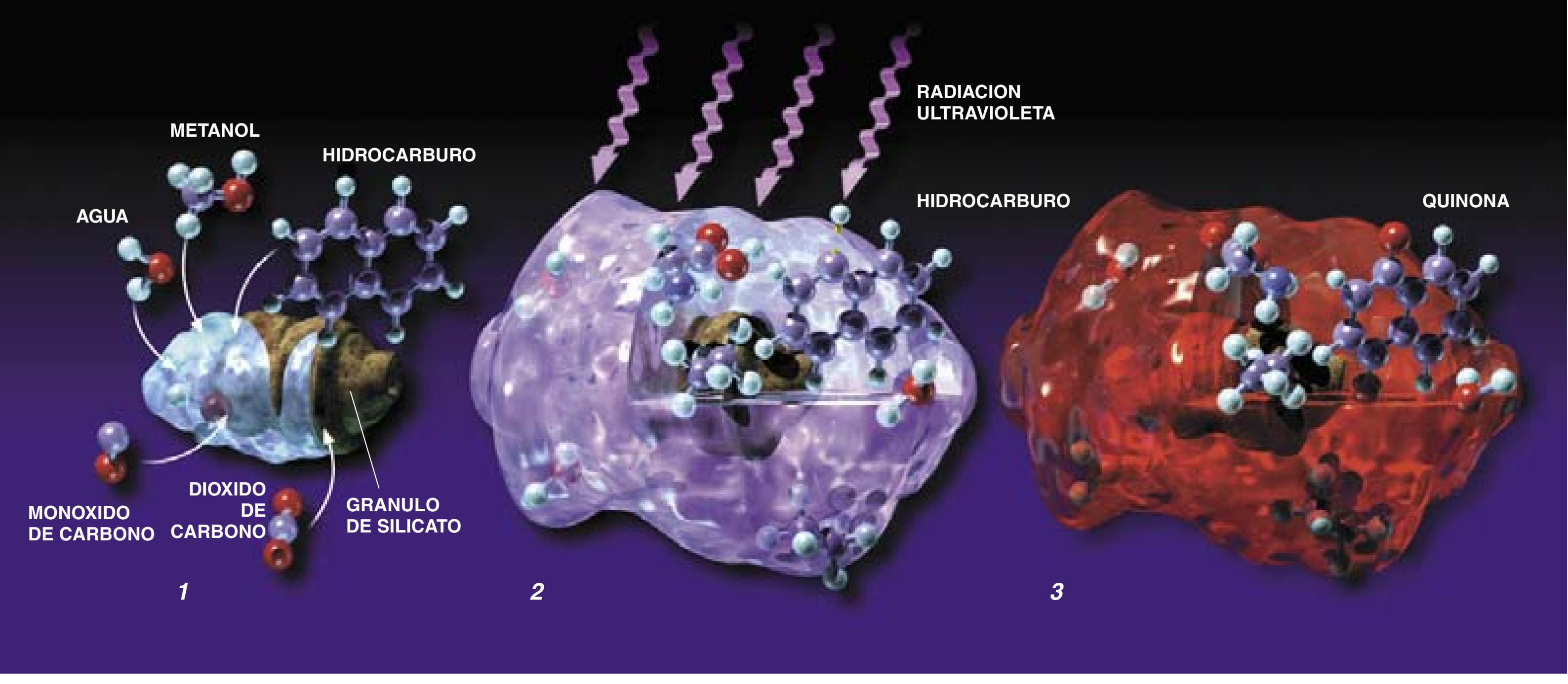
No hay unanimidad sobre el origen de los océanos terrestres, pero son muchos quienes coinciden en que los restos interestelares contribuyeron a ello. Se estima que cientos de toneladas de polvo caen sobre la superficie del planeta diariamente. Estos copos minúsculos —el más grande no es mayor que un grano de arena— se esparcen por el sistema solar interior y a veces atraviesan a gran velocidad el cielo nocturno como estrellas fugaces. Cada vez hay más pruebas de que, además de transportar los gases y el agua que hicieron de la Tierra un planeta habitable, los cometas y sus primos sazonaron la sopa primordial con moléculas orgánicas del mismo tipo que las de los seres vivos actuales.

Observaciones recientes de los célebres cometas Halley, Hale-Bopp y Hyakutake revelaron que estos helados vehículos están repletos de componentes orgánicos. Cámaras situadas a bordo de las astronaves Giotto y

NEBULOSA DEL AGUILA



3. LAS SIMULACIONES de laboratorio remedan lo que ocurre en las partes frías de las nubes interestelares como la Nebulosa del Aguila (*arriba a la derecha*). Un refrigerador y una bomba especiales generan en el interior de una cámara metálica del tamaño de una caja de zapatos un vacío comparable al del espacio, extremadamente frío (*derecha*). Una niebla de moléculas gaseosas sencillas rociada desde un tubo de cobre se congela sobre un disco salino, que funciona como el núcleo silíceo de un grano de hielo en el espacio (*1*). Una lámpara ultravioleta baña el hielo recién formado en una dosis potente de radiación parecida a la de las estrellas (*2*). Después se proyecta a través del hielo una luz infrarroja, emitida también por las estrellas, para determinar qué moléculas se encuentran congeladas en su interior (*3*). La comparación entre los espectros de absorción infrarroja revela que la composición del hielo del laboratorio tiene un sorprendente parecido con la del cósmico.



4. EL HIELO INTERESTELAR comienza a formarse cuando las moléculas de agua, de metanol y de hidrocarburos se congelan en gránulos de silicato, parecidos a la arena, que se mueven sin rumbo por las nubes interestelares densas (*1*). Las radiaciones ultravioletas de las estrellas próximas rompen algunos de los enlaces químicos de los productos congelados mientras que el grano de hielo alcanza un tamaño no mayor de una milésima de milímetro (*2*). Las moléculas rotas se recombinan en estructuras como las quinonas, que nunca se formarían de otro modo (*3*).

Vega captaron en 1986 imágenes de material oscuro en la superficie del cometa Halley, que recuerda al querogeno presente en algunos meteoritos, y los espectrómetros de masas vislumbraron moléculas ricas en carbono. Telescopios terrestres que inspeccionaban la cabellera y la cola de los cometas Hyakutake y Hale-Bopp distinguieron en ellas más recientemente varios compuestos orgánicos específicos, incluidos metano y etano. Varias sondas espaciales explorarán otros cometas durante los próximos veinte años.

Cuando un cometa pasa a través del sistema solar interior parte de él se evapora en forma de gas y de polvo, una porción de los cuales es recogida por la atracción gravitatoria de la Tierra. Los investigadores de la NASA hacen acopio de partículas cometarias de la atmósfera superior mediante aeronaves ER2, que vuelan el doble de alto que un avión a reacción comercial. A unos 19.000 metros de altitud, el polvo espacial se adhiere a unas placas de plástico cubiertas de aceite dentro de unos colectores situados bajo las alas de los aviones. Uno de nosotros (Sandford), entre otros investigadores que analizaron estas partículas microscópicas, encontró que algunas contenían hasta un 50 por ciento de carbono orgánico, más que cualquier otro objeto extraterrestre conocido. Incluso con una composición de tan sólo un 10 por ciento de carbono de media, el polvo espacial traería cerca de 30 toneladas de material orgánico a la Tierra cada día.

Los fragmentos de los asteroides que caen en la Tierra en forma de meteoritos se conocen mejor que los cometas distantes y que el polvo microscópico. Están compuestos mayoritariamente de metales y de roca, pero algunos de ellos también tienen bases nucleicas, cetonas, quinonas, ácidos carboxílicos, aminas y amidas. Del montón de sustancias orgánicas complejas extraídas de los meteoritos, las setenta variedades de aminoácidos han atraído la mayor atención. Sólo ocho de ellos pertenecen a los veinte empleados por las células vivas para formar proteínas, pero los de origen extraterrestre poseen un rasgo característico de la vida terrestre.

Los aminoácidos existen en parejas de imágenes especulares, una propiedad molecular denominada quiralidad. Igual que sucede con las manos de una persona, que se parecen cuando se presiona una palma contra la otra, pero se diferencian si se sitúa la palma contra los nudillos, los aminoácidos individuales pueden ser de forma levo o de forma dextro. Por razones poco conocidas y con pocas excepciones, los aminoácidos de un organismo vivo son de forma levo. Una de las críticas hechas a los experimentos de Miller es que producen igual número de ambas formas. Aquí es donde muestran su ventaja los aminoácidos extraterrestres. John R. Cronin lleva publicando desde 1993 datos que demuestran la existencia de un ligero exceso de formas levo en varios aminoácidos extraídos de dos meteoritos diferentes. Hay quienes creen que la conformación levo de la vida es pura casualidad, pero los ingredientes iniciales extraterrestres pudieran haber predeterminado esta peculiaridad molecular.

Puede que los aminoácidos sean las moléculas biológicamente más relevantes de los meteoritos, pero no son las más abundantes. La mayoría del carbono está inmovilizado en querogeno, un material que se compone en parte de hidrocarburos aromáticos policíclicos, sustancias mejor conocidas quizá como agentes contaminantes y carcinógenos. Producto de combustión que se encuentra en las carnes asadas a la parrilla muy quemadas y en los tubos de escape de los automóviles, estos hidrocarburos especiales causaron gran revuelo cuando se detectaron en el controvertido meteorito de Marte ALH 84001, del cual se dice que alberga pruebas de microbios marcianos fosilizados.

¿Horno o congelador?

Aunque esté claro que cometas, meteoritos y partículas de polvo aportan moléculas interesantes a la Tierra, averiguar dónde se originan estas moléculas ha sido más difícil.

Se ha propuesto la idea de que las reacciones que se producirían en el agua líquida que gotease por el interior de los cometas y de los asteroides de los que provienen algunos meteoritos serían las responsables parciales de su química orgánica. Pero estas reacciones apenas podrían explicar las partículas de carbono congeladas de las nubes interestelares negras.

Gana adeptos la opinión de que el hielo cometario es un residuo de la nube oscura originaria que se condensó en la nebulosa solar ardiente, la vorágine de gas y de polvo que generó el sol y los planetas. El hielo se conservó porque estuvo protegido en el congelador constituido por los bordes exteriores del sistema. No le faltan defensores al aserto más antiguo de que las moléculas orgánicas extraterrestres se originaron en el interior de la nebulosa. Según esta teoría, el hielo de la nube originaria se evaporó, las moléculas se disgregaron y volvieron a reagruparse durante la tumultuosa formación de los planetas.

Las moléculas que fueron sometidas a estas torturas dentro de la nebulosa solar y que luego pasaron a formar parte de los cometas deberían mostrar las señales isotópicas comunes a los planetas y a los demás objetos del sistema solar interior. Pero, por el contrario, el polvo de la mayoría de los cometas está enriquecido con elementos poco abundantes, como el deuterio (un isótopo del hidrógeno con un neutrón extra). El enriquecimiento de deuterio es una característica de las reacciones químicas en el ambiente de baja temperatura del espacio interestelar; las temperaturas permanecen clavadas allí justo por encima del cero absoluto y no hay suficiente energía más que para disgregar unas cuantas moléculas formadas a partir de los isótopos más pesados, que se van acumulando con el tiempo.

Es casi seguro que el verdadero origen de la mayoría de los cometas y meteoritos combina el congelador interestelar con el horno de la nebulosa. Esta dualidad es manifiesta en el polvo espacial, que abarca sustancias alteradas por grandes calores junto a otras que no lo han sido. Pese a todo, la gran cantidad de datos reunida durante los dos años de las observaciones de los cometas Hale-Bopp y Hyakutake ha reforzado la opinión de que los cometas proceden del medio interestelar. Docenas de investigadores han detectado similitudes sorprendentes entre determinadas moléculas y la abundancia de deuterio de los cometas con lo que es de común observación en los granos de hielo interestelares. El estado de giro de los átomos de hidrógeno mide los avatares experimentados por el hielo; el del hidrógeno contenido en el agua del cometa Hale-Bopp confirma que el hielo se formó aproximadamente a 25 kelvin (–248 grados centígrados) y que nunca alcanzó una temperatura superior.

¿Materias primas o vida auténtica?

Hay una gran diferencia entre el hecho de que las materias primas de la vida se dirijan a la Tierra a lomos de cometas y meteoritos y el de que sean organismos vivos del espacio quienes caigan y colonicen el planeta, una idea antigua conocida como panspermia. El médico italiano Francesco Redi desacreditó en el siglo XVII la idea, durante tanto tiempo aceptada, de que podía surgir vida de la materia inanimada, estableciendo que la vida sólo puede venir de la vida. El químico sueco y premio Nobel Svante A. Arrhenius propuso en 1908 que la radiación de las estrellas podría llevar gérmenes microscópicos de un mundo a otro.

No hubo muchos colegas suyos que estuvieran dispuestos a considerar tal posibilidad, por lo menos hasta hace poco. Informes controvertidos sobre la existencia de microbios fósiles en el meteorito marciano ALH 84001 avivaron la teoría de la panspermia en 1996, mientras que un informe del mismo año abona la idea de que los planetas interiores pudieran haber intercambiado toneladas de materia en los últimos miles de millones de años. Pese a todo, pocos son los que creen que en Marte hubiese vida alguna vez y muchos menos quienes admitan que los organismos de Marte pudieran haber sobrevivido el viaje de 80 millones de kilómetros hasta la Tierra. Aunque un microbio pudiera resistir el impacto que lo arrojase al espacio, las mortales radiaciones en él presentes y el vacío bajo cero actuando durante los miles de años de viaje lo destruirían con toda probabilidad.

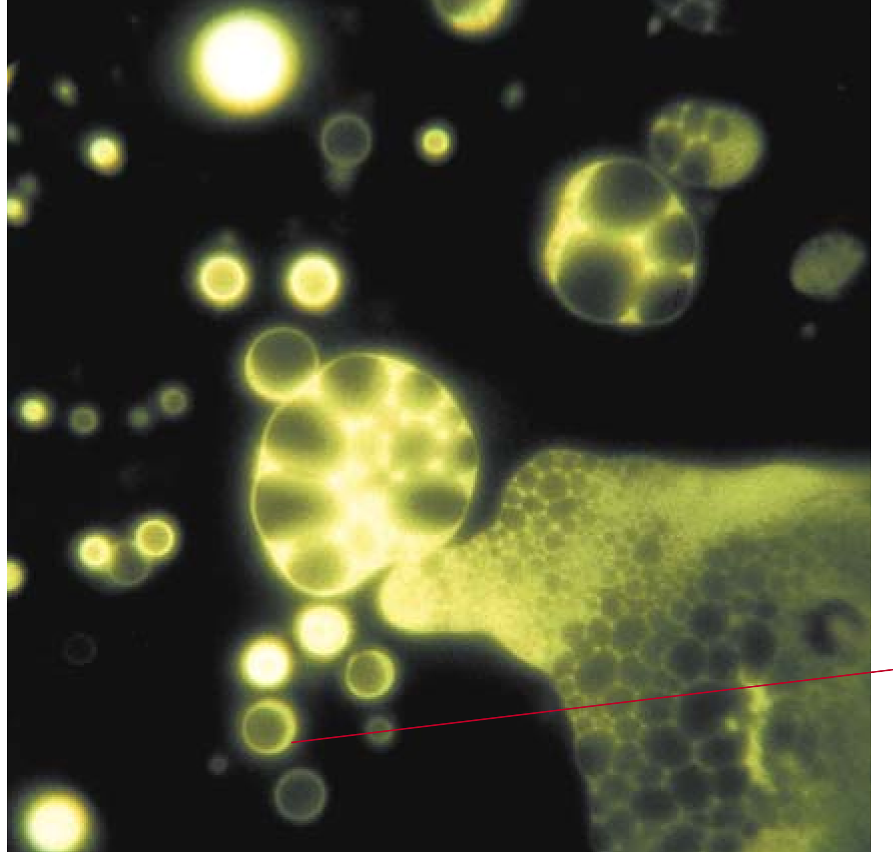
La colonización desde Marte parece innecesariamente complicada en estas condiciones, cuando la vida pudiera haber comenzado aquí mismo en la Tierra. Puede que la vida apareciese en Marte de forma independiente si poseyó en otro tiempo las condiciones aptas para ello, pues los cometas y los meteoritos que sembrarían la Tierra con agua y con moléculas orgánicas habrían proporcionado el mismo servicio a todos los cuerpos del sistema solar.

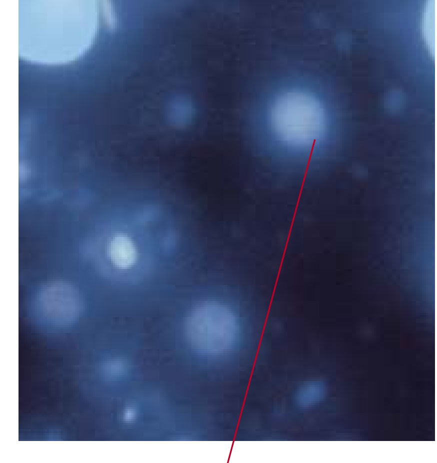
En diciembre una sonda nueva de la NASA buscará señales de vida en el suelo de Marte. Pero aunque apareciese vida en el planeta rojo, demostrar que tales organismos pudieran sobrevivir a un viaje desde su planeta natal y adaptarse a la Tierra es otra historia.

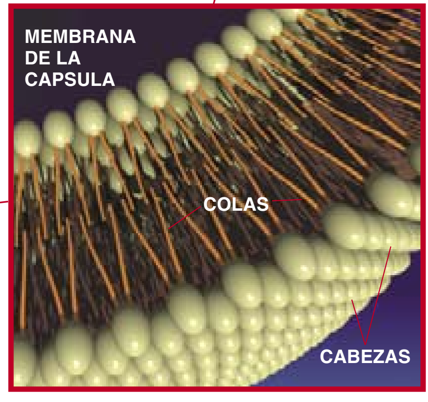
—M.P.B.



Paisaje marciano en 1997







5. LOS HIDROCARBUROS DEL ESPACIO pudieron servir de escudo a las moléculas precursoras de la vida. Los hidrocarburos de meteoritos (*verde*) —y productos similares hechos en el laboratorio en condiciones interestelares (*azul*)— se organizan en cápsulas agujereadas al mezclarse con agua. Las cabezas hidrófilas de las moléculas apuntan hacia el exterior de la membrana de la cápsula, al tiempo que las colas hidrófobas se ocultan en el interior (*inferior a la derecha*). Las esferas también emiten fluorescencia, lo que indica que dentro hay atrapados productos carbonados.

Si el hielo cometario proviene de las nubes interestelares, es fácil admitir que las moléculas orgánicas lo hicieran también. Los astrónomos ven señales de compuestos orgánicos por todas partes del universo, especialmente entre las nebulosas. Un decenio de investigaciones ha revelado que los hidrocarburos aromáticos policíclicos son los productos carbonados más abundantes en el universo, en cuyos enrejados moleculares se contiene hasta el veinte por ciento del carbono galáctico total.

La deducción de la composición de partículas microscópicas de polvo y de hielo que se encuentran alejadas de nosotros cientos de años luz es posible en parte merced a observaciones astronómicas de nubes como la nebulosa del Aguila. Estas nubes oscuras absorben algo de la radiación infrarroja de las estrellas cercanas. Cuando el resto de la radiación alcanza a los detectores terrestres y se separa en un espectro, la luz que falta en ciertas longitudes de onda corresponde a los enlaces químicos particulares que absorbieron la luz.

Nubes en el laboratorio

Mediante la comparación del espectro infrarrojo de las nubes del espacio con mediciones de réplicas del hielo interestelar hechas en el laboratorio se ha determinado que los granos de hielo de las nubes

Misiones a los cometas

Rosetta
El estudio cometario más completo
Un satélite se reunirá con el **cometa Wirtanen** en 2013 y pasará once meses realizando mediciones desde la órbita en que se situará, al tiempo que un vehículo aterrizará y sondeará la superficie del cometa.
Lanzamiento: 2003
(Agencia Espacial Europea)

Stardust
Primeras muestras de material cometario
Una sonda volará a través de la cabellera gaseosa del **cometa Wild 2** en el año 2004 y usará un aerogel para recolectar muestras de polvo. Retornará a la Tierra en el 2006.
Lanzamiento: 7 de febrero de 1999
(NASA)

Champollion
Un pionero fallido
La NASA consideró durante un tiempo el lanzamiento independiente en el 2003 de un satélite que habría enviado un vehículo que aterrizara sobre el **cometa Tempel 1**, y analizara su composición en el 2005. El proyecto se ha cancelado en julio de 1999 por dificultades presupuestarias.

oscuras están congelados en núcleos de silicato y de carbono. El hielo se compone principalmente de agua, pero a menudo contiene hasta un diez por ciento de moléculas simples, como dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, metanol y amoníaco.

Quisimos entender cómo estas moléculas interestelares tan sencillas y abundantes sufren reacciones mientras se encuentran dentro del hielo que las transforman en las sustancias más complicadas que aparecen en los meteoritos. Allamandola, que se había especializado como químico criogénico, decidió construir una nube interestelar en el laboratorio.

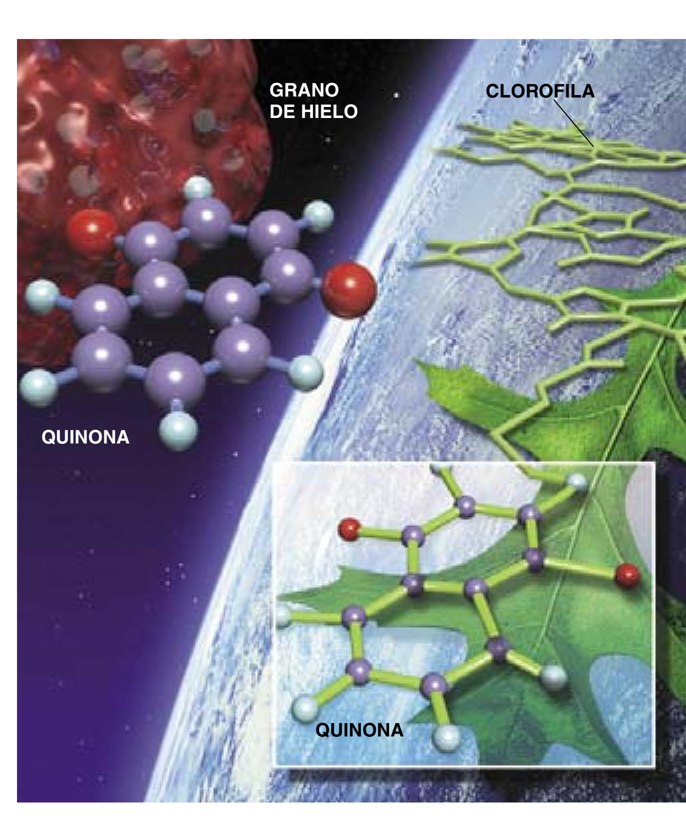
Refrigeradores y bombas generan un espacio vacío y frío dentro de una cámara metálica de unos 20 centímetros de lado. Se rocía una niebla de moléculas gaseosas sencillas por medio de un tubo de cobre sobre un disco de yoduro de aluminio o de yoduro de cesio de un par de centímetros de diámetro, que desempeña la función de núcleo del grano espacial. Una lámpara ultravioleta pequeña proyecta una radiación parecida a la estelar dentro de la cámara, lo que completa el remedo.

Nuestros experimentos revelan que incluso a temperaturas y presiones extremadamente bajas la radiación ultravioleta rompe los enlaces químicos igual que lo hace en la atmósfera terrestre, donde disocia los clorofluorocarbonatos y otros productos químicos.

En el caso de los átomos espaciales, encerrados en hielo, el proceso de rotura de enlaces puede hacer que los fragmentos moleculares se recombinen en estructuras extraordinariamente complejas, que no serían posibles si estos segmentos fueran libres de separarse. En cualquier lugar del espacio donde se observen estos granos de hielo se encuentran en formación productos químicos complejos, sobre todo en las regiones circundantes de las estrellas jóvenes, donde abunda la radiación ultravioleta. El grano de hielo que crece en nuestra cámara recibe el mismo tipo de radiación a la que estaría expuesto durante milenios un grano espacial.

Comenzando con un hielo simple de agua, metanol y amoníaco —en las mismas proporciones a las observadas en el hielo espacial— el experimento originó productos complejos como las cetonas, los nitrilos, los éteres y los alcoholes hallados en los meteoritos carbonados. Creamos también hexametilenotetramina, HMT, una molécula de seis carbonos que se sabe que produce aminoácidos en agua ácida y caliente. Se observó también la presencia de moléculas que tenían hasta 15 enlaces entre carbonos.

Algunos de estos productos exhibieron una tendencia curiosa, que pudo tener algo que ver con los tejemanejes de la vida primitiva. David W. Deamer descubrió que algunas de las moléculas de los granos de hielo de la cámara nebular forman pequeñas gotas parecidas a cápsulas cuando se encuentran en el agua. Estas cápsulas se parecen mucho a las que obtuvo hace diez años usando extractos del meteorito de Murchison, Australia. Cuando mezcló los productos orgánicos del meteorito con agua, se ensamblaron espontáneamente en estructuras esféricas similares a las membranas celulares. Jason Dworkin ha demostrado que estas cápsulas están hechas de una multitud de moléculas orgánicas complejas.



6. LAS QUINONAS DEL ESPACIO tienen estructuras casi idénticas a las que participan en la transferencia de energía de una parte a otra de la célula vegetal realizada por las moléculas de clorofila.

Las moléculas entre las que se produce esta autoorganización suelen tener una docena o más de átomos de carbono y tienen que ser anfifílicas, es decir, que sus cabezas hidrófilas se orientan hacia el agua mientras que sus colas hidrófobas permanecen ocultas dentro de la membrana. Tanto las burbujas de los extractos meteoríticos como las obtenidas en la cámara emiten fluorescencia, lo que indica que han quedado atrapados dentro otros productos orgánicos.

Los productos que quizá tengan mayor importancia biológica de entre los nuestros son los obtenidos cuando empleamos como punto de partida hielos acuosos empapados de hidrocarburos aromáticos policíclicos, que se sabe que abundan en las nubes. En las condiciones interestelares los hidrocarburos se convierten en muchos de los componentes de los meteoritos ricos carbonados, incluidos alcoholes y éteres más complejos, así como quinonas, lo que tiene mayor relevancia. Las quinonas son ubicuas en los sistemas vivos actuales y pueden estabilizar electrones desaparejados, una habilidad que las células vivas necesitan para diversas actividades de transferencia de energía. Los ingredientes activos del aloe y de la alheña son quinonas.

La capacidad de transportar electrones que tienen estas moléculas tan versátiles desempeña un papel esencial en la conversión de la luz en energía química, como se realiza en la fotosíntesis. Esta facultad resulta más intrigante en el contexto de la Tierra primitiva si se la asocia con la capacidad de las quinonas para absorber radiación ultravioleta, que constituye un peligro serio para las moléculas frágiles como son los aminoácidos. Las quinonas extraterrestres pudieran haber actuado como escudos protectores de los ultravioletas antes de que se desarrollara la capa protectora de ozono terrestre. También pudieran haber sido las moléculas empleadas por las primeras formas de vida del planeta para atrapar la luz a la hora de realizar los precursores primitivos de la fotosíntesis.

De las moléculas a la vida

Sabemos por experimentos de laboratorio y por observaciones astronómicas que las condiciones aparentemente estériles del espacio

MAX P. BERNSTEIN, SCOTT A. SANDFORD y LOUIS J. ALLAMANDOLA trabajan en el Laboratorio de Astroquímica del Centro de Investigación Nacional de Aeronáutica y Administración Espacial (NASA) Ames. Bernstein trabaja como contratista de NASA Ames y es miembro del Instituto norteamericano de Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre en Mountain View, California. Simuló la química orgánica de los cometas y de los granos de hielo interestelares y meditó sobre su conexión con el origen de la vida. Sandford y Allamandola son dos empleados civiles en la NASA Ames. Sandford, que realizó un trabajo seminal en partículas de polvo interplanetario, es editor asociado de la revista *Meteoritics and Planetary Science* y es coinvestigador en la misión *Stardust* de la NASA. Allamandola, el fundador y director del Laboratorio de Astroquímica Ames, tiene 20 años de experiencia en estudios líderes de hielos interestelares y del sistema solar, y es el autor de la teoría de los hidrocarburos aromáticos policíclicos.
Puede saberse más de ellos y de sus investigaciones en la dirección de Internet http://web99.arc.nasa.gov/~astrochm/

remoto generan compuestos orgánicos complejos que meteoritos y polvo nos siguen trayendo actualmente. Si reconsideramos la aparición de la vida desde este punto de vista, podremos observar que la llegada de aminoácidos, quinonas, moléculas anfifílicas y otras sustancias orgánicas extraterrestres pudiera haber posibilitado el surgimiento de la vida o al menos haber facilitado su desarrollo. Quizá los aminoácidos extraterrestres construyeron las primeras proteínas y quizá las moléculas anfifílicas dieron lugar a la capacidad de aprovechamiento de la luz de las quinonas, pero se desconoce el papel exacto que desempeñaran. Las sustancias extraterrestres pudieran no haber sido más que materias primas para las reacciones químicas que produjeran otras moléculas completamente diferentes.

Se puede imaginar que una molécula, literalmente caída del cielo, pudiera haber desencadenado o acelerado una reacción química sencilla, pero que resultase clave para los inicios de la vida. Si las moléculas precursoras de la vida se ensamblaron realmente en una sopa primordial, los aminoácidos del espacio pudieran haber proporcionado las cantidades necesarias para hacerlo posible. Los procesos creadores de vida que tuvieran lugar en las profundidades marinas pudieran haber incorporado igualmente partes de los productos extraterrestres caídos sobre los océanos. La capacidad de ejecutar estos procesos químicos con mayor rendimiento conferiría una ventaja evolutiva, de manera que, con el tiempo, tales reacciones sencillas quedarían profundamente ligadas a lo que son ahora reacciones químicas reguladas por proteínas.

Es evidente que hay todavía una gran distancia entre la aparición de los compuestos orgánicos más complejos y el código genético, el metabolismo y la autorreplicación, aspectos esenciales de la definición de vida. Pero si las moléculas orgánicas del espacio tuvieron algo que ver con la vida terrestre, esto significa, dada su omnipresencia, que estuvieron y siguen estando disponibles en muchos otros sitios para permitir la aparición de la vida.

Los indicios de que se dieron condiciones aptas para la vida en Marte y bajo la superficie helada de la luna de Júpiter Europa indican que otros sitios en nuestro sistema solar pudieran haber obtenido aportaciones extraterrestres. La ubicuidad de las moléculas orgánicas complejas en el espacio, combinada con los recientes descubrimientos de planetas alrededor de otras estrellas, hace más probable que las condiciones que favorecen la vida, si no la vida misma, se hayan desarrollado también en otros sistemas solares.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ASTROCHEMICAL EVOLUTION OF THE INTERSTELLAR MEDIUM. Emma L. O. Bakes. Twin Press Astronomy Publishers, 1997.

COMETS AND THE ORIGIN AND EVOLUTION OF LIFE. Dirigido por Paul J. Thomas, Christopher F. Chyba y Christopher P. McKay. 1997.

PASTEUR, LIGHT AND LIFE. John Cronin en *Physics World*, volumen 11, n.º 10, páginas 23-24; octubre de 1998.

UV IRRADIATION OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN ICES: PRODUCTION OF ALCOHOLS, QUINONES, AND ETHERS. Max P. Bernstein et al. en *Science*, vol. 283, páginas 1135-1138; 19 de febrero de 1999.

Vacunas genéticas

Las vacunas fabricadas con productos genéticos puede que consigan prevenir el sida, el paludismo y otras terribles infecciones insensibles a las técnicas de inmunización actuales.

David B. Weiner y Ronald C. Kennedy



Cabe afirmar que las vacunas constituyen el mayor logro de la medicina moderna. Han permitido erradicar la viruela, han colocado a la poliomielitis al borde de la extinción y han protegido a un sinnúmero de personas del tifus, el tétanos, el sarampión, la hepatitis A, la hepatitis B, el rotavirus y otras infecciones peligrosas. Pero hay muchas enfermedades mortales o muy graves, entre las que se cuentan el paludismo, el sida, los virus herpes y la hepatitis C, para las que no existen vacunas eficaces. Y esto se debe a que los métodos de inmunización habituales funcionan mal o comportan riesgos inaceptables cuando se dirigen contra ciertas enfermedades.

Es indudable que se necesitan otros enfoques. Uno de los más prometedores es la creación de vacunas con material genético, ya sea ADN o ARN. Durante los últimos diez años se ha producido un cambio de actitud respecto a ellas, pasándose de vilipendiarlas a estudiarlas con intensidad en los ámbitos académicos e industriales, sometiéndolas también a las primeras fases de los ensayos clínicos.

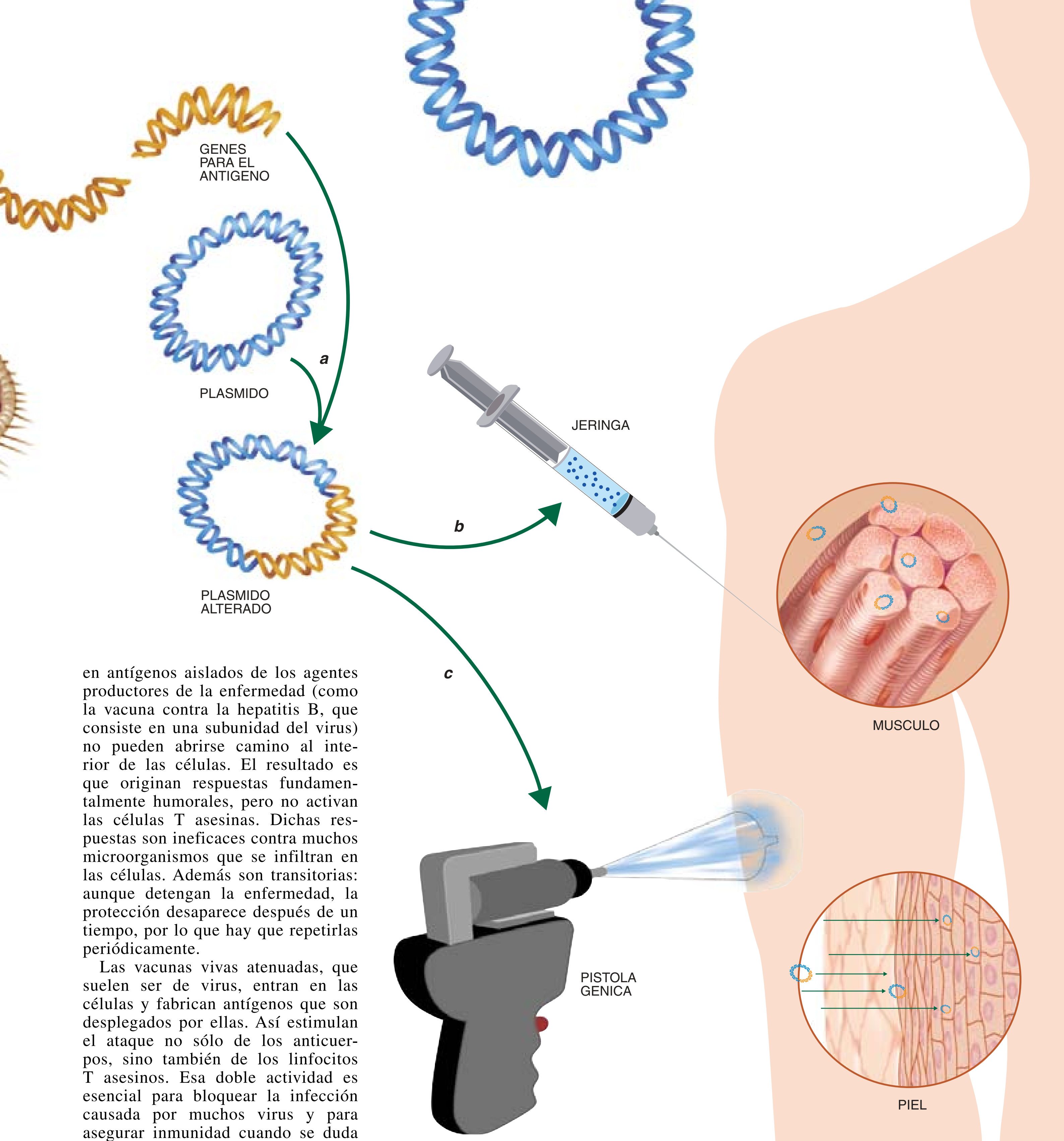
Cuando se comprenden las acciones de las vacunas tradicionales, se ven con más claridad los méritos de la inmunización genética. Consisten fundamentalmente las primeras en una versión muerta o debilitada de un patógeno (agente que produce la enfermedad) o en algún fragmento (subunidad) suyo. Al igual que en la mayoría de las vacunas genéticas en estudio, el propósito de las vacunas habituales consiste en preparar el sistema inmunitario para que rechace rápidamente los virus, las bacterias y los parásitos peligrosos antes de que logren establecerse en el organismo. Consiguen este efecto engañando al sistema inmunitario para que se comporte como si el organismo estuviera siendo ya acosado por un microorganismo que se multiplicara sin freno y produjera grandes daños a los tejidos.

Cuando responde a una infección real, el sistema inmunitario se guía por los antígenos foráneos. Los antígenos son sustancias producidas en exclusiva por el agente causante y no por el huésped; normalmente son proteínas o fragmentos proteicos. Dos ramas principales pueden entrar en juego y las dos reciben ayuda crucial de los leucocitos sanguíneos conocidos como linfocitos T auxiliares. La rama humoral, dirigida por los linfocitos B, actúa sobre microorganismos patógenos que están fuera de las células. Esas células B secretan moléculas de anticuerpo que se adhieren a los agentes infecciosos y con ello los neutralizan o los marcan para que sean destruidos por otras partes del sistema inmunitario. La rama celular, encabezada por los linfocitos T citotóxicos (asesinos), erradica los patógenos que colonizan las células. Las células infectadas despliegan fragmentos de las proteínas de sus atacantes sobre su superficie de una manera particular. Cuando los linfocitos T citotóxicos "ven" esas señales sobre las células, suelen destruirlas y con ellas los infiltrados de su interior.

Además de eliminar a los invasores, la activación del sistema inmunitario contra un patógeno específico induce la creación de células de memoria que pueden repeler a los mismos patógenos en el futuro. Las vacunas confieren protección del mismo modo, induciendo respuestas inmunitarias y la consiguiente formación de células de memoria.

Pero las vacunas habituales varían en cuanto a la clase y a la duración de la seguridad que proporcionan. Las basadas en patógenos muertos (como las de la hepatitis A y la vacuna de la poliomielitis inyectada, o Salk) y

DAVID B. WEINER y RONALD C. KENNEDY han contribuido de manera significativa al desarrollo de las vacunas genéticas. Weiner, pionero en el estudio de las vacunas antivíricas de ADN, es profesor asociado de anatomía patológica y de medicina de laboratorio y miembro del Instituto de Terapia Génica Humana en la Universidad de Pennsylvania. Kennedy, profesor de microbiología e inmunología, y de obstetricia y ginecología en el Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Oklahoma, estudia las vacunas génicas contra el cáncer, así como las dirigidas específicamente contra agentes infecciosos.



en antígenos aislados de los agentes productores de la enfermedad (como la vacuna contra la hepatitis B, que consiste en una subunidad del virus) no pueden abrirse camino al interior de las células. El resultado es que originan respuestas fundamentalmente humorales, pero no activan las células T asesinas. Dichas respuestas son ineficaces contra muchos microorganismos que se infiltran en las células. Además son transitorias: aunque detengan la enfermedad, la protección desaparece después de un tiempo, por lo que hay que repetirlas periódicamente.

Las vacunas vivas atenuadas, que suelen ser de virus, entran en las células y fabrican antígenos que son desplegados por ellas. Así estimulan el ataque no sólo de los anticuerpos, sino también de los linfocitos T asesinos. Esa doble actividad es esencial para bloquear la infección causada por muchos virus y para asegurar inmunidad cuando se duda de que la respuesta humoral sea suficiente por sí sola. Las vacunas vivas (como las del sarampión, las paperas, la rubéola, la poliomielitis por vía oral [Sabin] y la viruela) suelen conferir además inmunidad de por vida, considerándose por todo ello como el "patrón de oro" de las vacunas actuales.

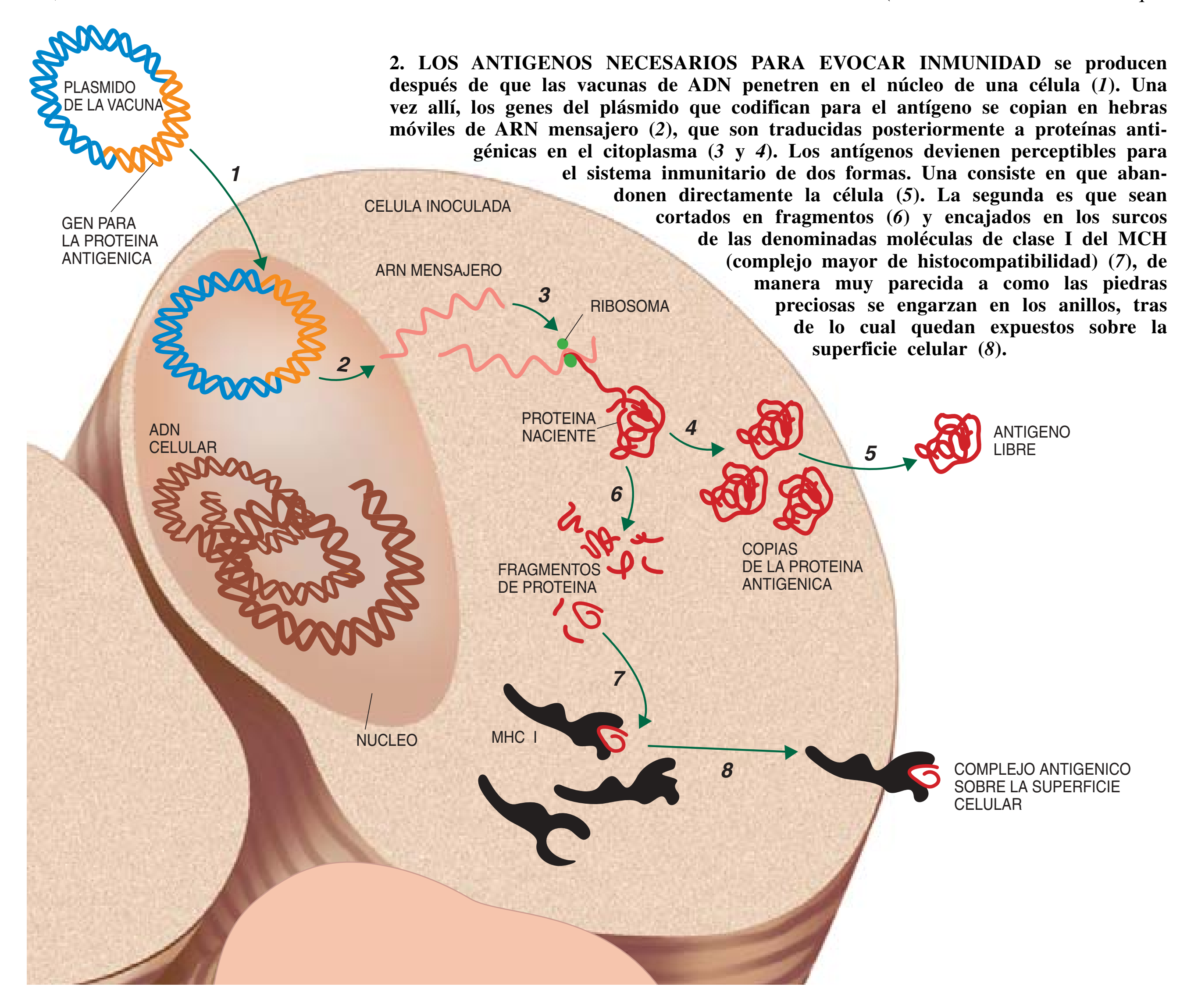
1. DISEÑO DE UNA VACUNA GENETICA. Se precisa normalmente el aislamiento de uno o más genes del agente causante de la enfermedad (patógeno) y el empalme de esos genes a plásmidos (*a*), anillos cerrados de ADN. Los anillos se liberan luego en el interior de grupos pequeños de células, a menudo mediante inyección muscular (*b*) o proyectándolos sobre la piel con la denominada pistola génica (*c*). Los genes elegidos codifican para los antígenos (sustancias capaces de desencadenar una respuesta inmunitaria) que suelen ser sintetizados por el microorganismo patógeno.

Esto no quiere decir que no cuenten con sus propios problemas. No sólo pueden fallar en algunos casos, sino que, cuando funcionan, pueden inducir el desarrollo completo de la enfermedad en personas cuyo sistema inmunitario no esté en perfectas condiciones, como les sucede a los pacientes cancerosos sometidos a quimioterapia, a los que tienen sida y a los ancianos. Todas estas personas pueden contraer también la enfermedad por contagio de personas sanas que hayan sido inoculadas recientemente. Por si fuera poco, los virus debilitados experimentan a veces mutaciones que restauran su virulencia, como ha ocurrido en algunos monos a los que se administró una forma simia atenuada del VIH, el virus que causa el sida. Hay enfermedades en las que los riesgos de inversión de la virulencia son intolerables.

Las vacunas de microorganismos completos, ya sean vivos o muertos, tienen también inconvenientes. Al estar compuestas por patógenos completos, conservan moléculas que no intervienen en la provocación de inmunidad protectora. También pueden incluir contaminantes que sean productos secundarios inevitables del proceso de fabricación, sustancias extrañas que a veces originan reacciones alérgicas o peligrosas.

La estructura de las vacunas genéticas es bastante diferente de la de las tradicionales. Las más estudiadas consisten en plásmidos (pequeños anillos de ADN de doble hélice derivados originalmente de las bacterias, pero totalmente incapaces de producir una infección). Los plásmidos utilizados para inmunización han sido alterados con objeto de que transporten genes específicos de una o más proteínas antigénicas normalmente sintetizadas por un patógeno seleccionado, al tiempo que se excluyen los genes que permitirían que el patógeno se reconstituyera y causase la enfermedad.

Suelen administrarse mediante inyección o utilizando un dispositivo denominado pistola génica. La inyección, que normalmente es en un músculo, introduce los genes directamente en algunas células e induce su captación por parte de las células situadas en los alrededores de la aguja insertada. La pistola génica impulsa los plásmidos al interior de las células que están cerca de la superficie del organismo, que suelen ser las de la piel y las de las mucosas. Una vez en el interior de las células, alguno de los plásmidos recombinantes se abre camino hasta el núcleo y da instrucciones a la célula para que sintetice las proteínas antigénicas codificadas. Esas proteínas pueden desencadenar la inmunidad humoral (de tipo anticuerpos), cuando escapan de las células, y la inmunidad celular (células asesinas), cuando son descompuestas y desplegadas de la manera adecuada sobre la superficie celular (exactamente lo mismo que



2. LOS ANTIGENOS NECESARIOS PARA EVOCAR INMUNIDAD se producen después de que las vacunas de ADN penetren en el núcleo de una célula (*1*). Una vez allí, los genes del plásmido que codifican para el antígeno se copian en hebras móviles de ARN mensajero (*2*), que son traducidas posteriormente a proteínas antigénicas en el citoplasma (*3* y *4*). Los antígenos devienen perceptibles para el sistema inmunitario de dos formas. Una consiste en que abandonen directamente la célula (*5*). La segunda es que sean cortados en fragmentos (*6*) y encajados en los surcos de las denominadas moléculas de clase I del MCH (complejo mayor de histocompatibilidad) (*7*), de manera muy parecida a como las piedras preciosas se engarzan en los anillos, tras de lo cual quedan expuestos sobre la superficie celular (*8*).

ocurre cuando las células albergan un patógeno activo).

Estas peculiaridades suscitan la esperanza de que, una vez perfeccionadas para su uso en los seres humanos, las vacunas de ADN conserven todos los aspectos positivos de las vacunas tradicionales, a la vez que eviten sus riesgos. Además de activar las dos ramas del sistema inmunológico, serán incapaces de causar infección, porque carecerán de los genes necesarios para la replicación de un microorganismo patógeno. Presentan las ventajas adicionales de que son fáciles de diseñar y que pueden producirse en grandes cantidades utilizando las técnicas de ADN recombinante, ahora tan comunes, siendo igual de estables o más que las otras vacunas en lo que a almacenamiento se refiere. Su fabricación y su amplia distribución deberían ser, pues, relativamente baratas. Dado que pueden componerse de manera que transporten genes de varias cepas de un microorganismo patógeno, cuentan con la posibilidad de proporcionar inmunidad simultánea contra todas ellas, algo que será muy útil cuando se trate de microorganismos muy variables, como sucede con los virus de la gripe y del VIH.

Se están haciendo pruebas con vacunas compuestas de ARN, un pariente de cadena sencilla del ADN. El ARN introducido en las células induce fácilmente la síntesis de las proteínas codificadas, pero es menos estable que el ADN, lo que puede ocasionar problemas a la hora de la fabricación y de la distribución de la vacuna. Estas dificultades son probablemente superables. Pero como las vacunas de ARN se han estudiado con mucha menos amplitud que las de ADN, nos concentraremos en estas últimas.

La idea de que los genes pudiesen actuar como vacunas surgió en parte de investigaciones iniciadas hace casi medio siglo. Experimentos que no tenían nada que ver con vacunas demostraron en los años cincuenta y sesenta que la liberación de material genético dentro las células de un animal podía desencadenar cierta síntesis de las proteínas codificadas, así como de anticuerpos dirigidos específicamente contra esas proteínas. Los investigadores utilizaron a veces esta capacidad de fabricación de anticuerpos como una forma fácil de demostrar la generación de determinada proteína por un gen dado.

La posibilidad de que los genes insertados indujeran una respuesta inmunitaria atrajo luego la atención de otros investigadores, esta vez como consecuencia de un fenómeno decepcionante. Quienes intentaban desarrollar la terapia génica (liberación de genes para corregir trastornos hereditarios y de otro tipo) observaron que, a veces, las proteínas sintetizadas a partir de los genes terapéuticos eran destruidas en el cuerpo de los animales que los recibían. La razón era que se producía una reacción inmunológica a proteínas no familiares.

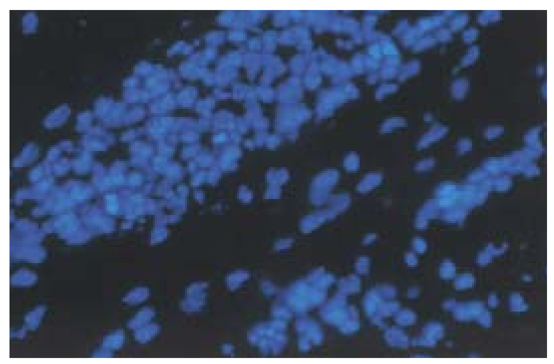
Algunos laboratorios habían empezado a explorar a principios de los noventa la posibilidad de utilizar esta respuesta inmunitaria no deseada para un buen fin, la vacunación. Los escépticos fueron muchos al principio; se dudaba, por ejemplo, que la inmunidad desencadenada fuera lo bastante fuerte como para proteger a un ser humano de la infección causada por un patógeno vivo.

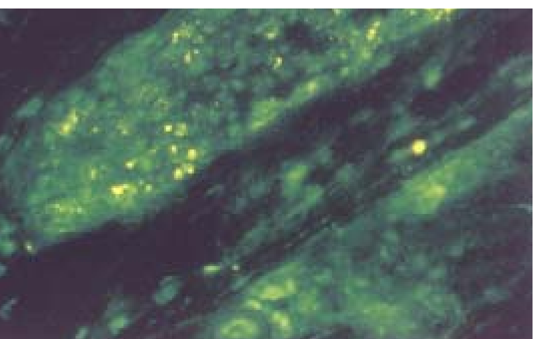
Pero un conjunto de estudios animales realizados por grupos independientes demostró con rotundidad en 1992 que la idea era sólida. Esos grupos estuvieron dirigidos por Stephen A. Johnston, por Philip Felgner y Margaret Liu, por Harriet L. Robinson y por Weiner, uno de los autores.

Todos ellos y muchos otros realizados en los años siguientes revelaron que las vacunas de ADN liberadas en las células podían estimular el sistema inmunitario de los roedores y de los primates para que generase respuestas de células B, de células T citotóxicas y de células T auxiliares contra muchos patógenos diferentes e incluso contra ciertos tipos de cáncer. La investigación demostró también que podían desencadenarse respuestas inmunitarias y de protección contra las enfermedades utilizando diferentes vías de administración. El efecto podía reforzarse además por diversos métodos que facilitaban la captación de ADN por las células.

Muchos otros investigadores han vuelto su atención a las vacunas de ADN desde entonces y la técnica ha avanzado hasta el primer escalón de los ensayos humanos, que se centran en la seguridad. El primero empezó en 1995, cuando se liberaron plásmidos que contenían genes del VIH en pacientes ya infectados por ese virus. Los ensayos de mayor envergadura se iniciaron en 1996 y marcaron un hito histórico por otra razón: era la primera vez que los médicos introducían genes nuevos (que contenían información de las proteínas del VIH o de la gripe) en personas sanas, en vez de hacerlo en personas enfermas.

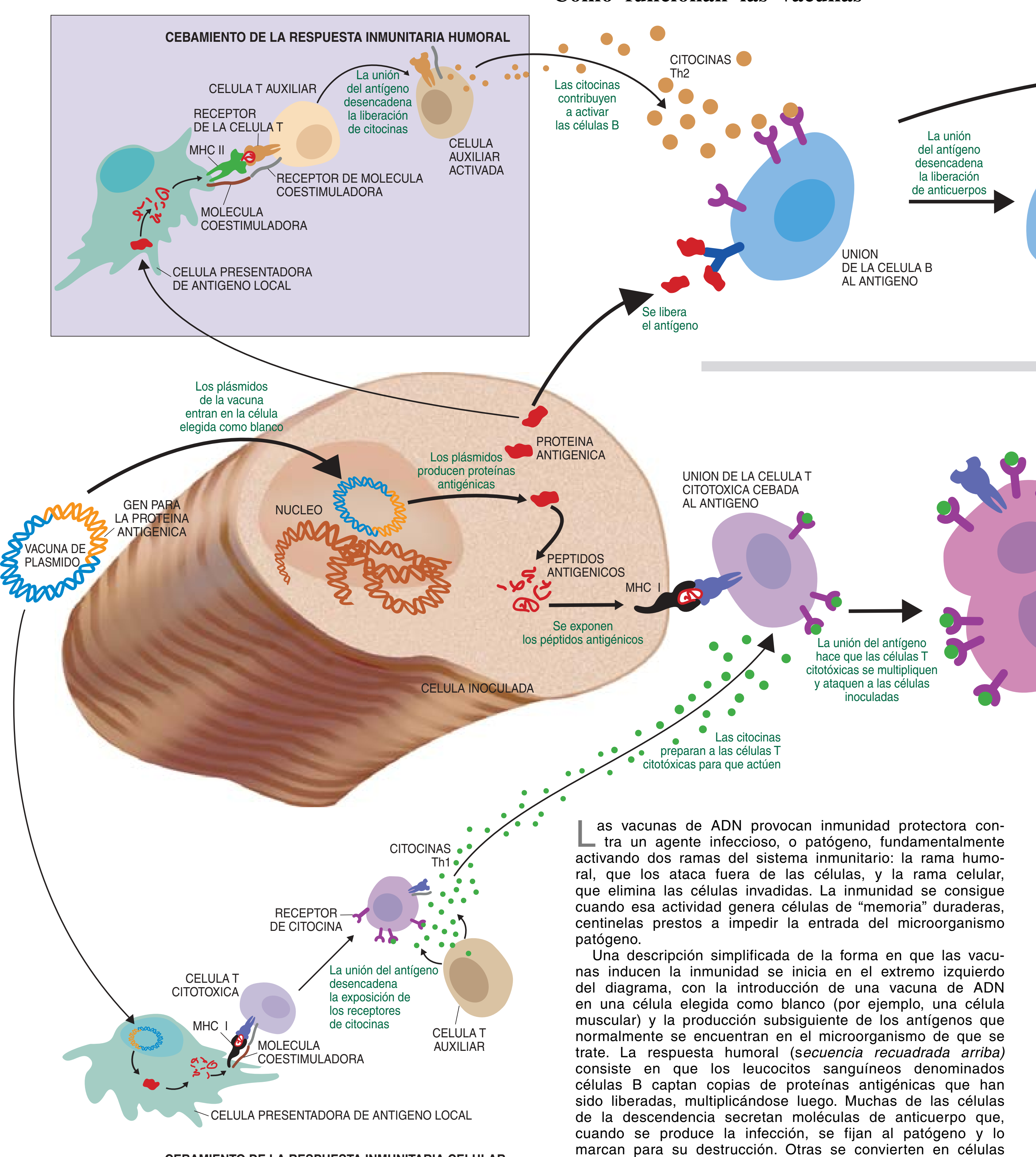
Los ensayos clínicos actuales se refieren a vacunas diseñadas para prevenir diversas infecciones (por el VIH, el herpes, la gripe, la hepatitis B y *Plasmodium*, el parásito responsable del paludismo), para reforzar la inmunidad deteriorada de los pacientes ya infectados por el VIH y para tratar una serie de cánceres (entre ellos los linfomas y las neoplasias malignas de la próstata y del colon). Aunque el cáncer no sea una enfermedad infecciosa, hay muchos datos que indican que el hacer trabajar a las defensas inmunitarias del organismo puede contribuir a combatirlo.





3. ESTAS CELULAS MUSCULARES, identificadas por el marcador azul (*arriba*), se hicieron brillar en verde (*abajo*) después de ser inyectadas con una vacuna de ADN portador de genes del virus de la inmunodeficiencia humana (VIH). El color verde indica que las células fabricaban la proteína del VIH especificada por los genes víricos. Estas micrografías constituyen algunas de las pruebas de que las vacunas de ADN pueden generar las proteínas necesarias para evocar las respuestas inmunitarias.

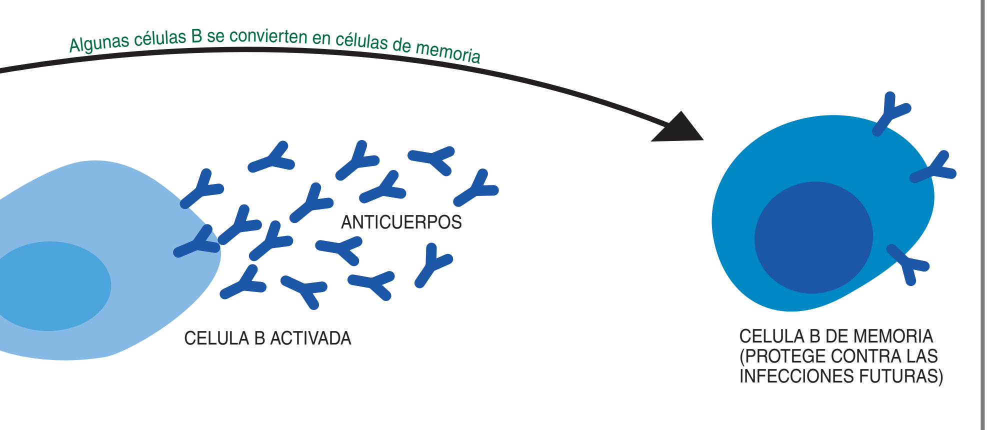
Cómo funcionan las vacunas

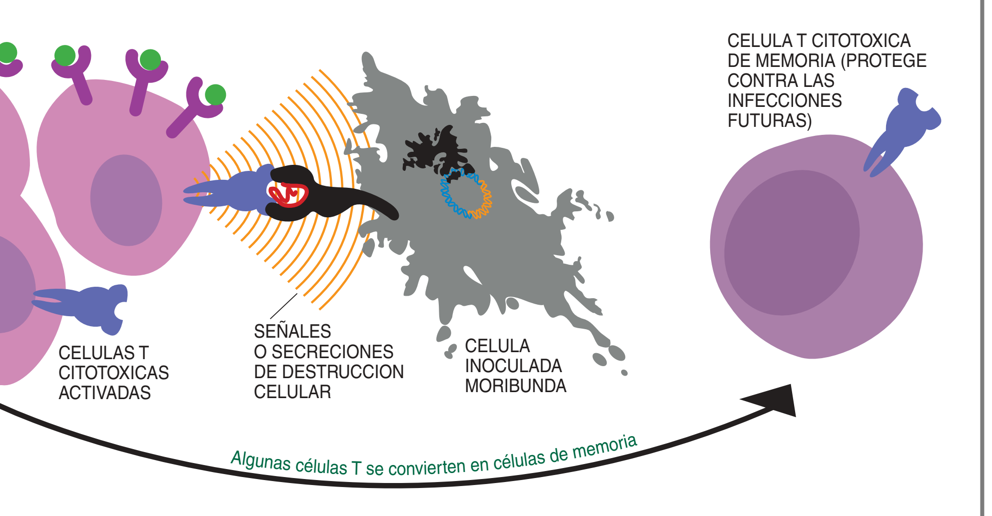


Las vacunas de ADN provocan inmunidad protectora contra un agente infeccioso, o patógeno, fundamentalmente activando dos ramas del sistema inmunitario: la rama humoral, que los ataca fuera de las células, y la rama celular, que elimina las células invadidas. La inmunidad se consigue cuando esa actividad genera células de "memoria" duraderas, centinelas prestos a impedir la entrada del microorganismo patógeno.

Una descripción simplificada de la forma en que las vacunas inducen la inmunidad se inicia en el extremo izquierdo del diagrama, con la introducción de una vacuna de ADN en una célula elegida como blanco (por ejemplo, una célula muscular) y la producción subsiguiente de los antígenos que normalmente se encuentran en el microorganismo de que se trate. La respuesta humoral (*secuencia recuadrada arriba)* consiste en que los leucocitos sanguíneos denominados células B captan copias de proteínas antigénicas que han sido liberadas, multiplicándose luego. Muchas de las células de la descendencia secretan moléculas de anticuerpo que, cuando se produce la infección, se fijan al patógeno y lo marcan para su destrucción. Otras se convierten en células de memoria que reprimen el patógeno que circule fuera de las células.

Mientras tanto, el despliegue de fragmentos proteicos, o péptidos, antigénicos sobre las células inoculadas (en el interior de los surcos de las moléculas de clase I del MHC)





puede desencadenar una respuesta celular (*secuencia recuadrada de abajo*). La unión a los complejos antigénicos induce la multiplicación de los leucocitos sanguíneos conocidos como células T citotóxicas (asesinas) y la destrucción de las células ligadas y de otras células que exhiban los mismos péptidos de la misma manera. Algunas células activadas se convertirán también en células de memoria, listas para eliminar células invadidas por el patógeno en el futuro.

Tienen que ocurrir diversas etapas preliminares antes de que esas respuestas puedan producirse realmente. Con objeto de preparar el escenario para la activación de las células B (*recuadro superior*), las células presentadoras de antígeno “profesionales” (CPA) tienen que ingerir las moléculas de antígeno, cortarlas y mostrar los péptidos resultantes en las moléculas de clase II del complejo MHC. Las células T auxiliares, a su vez, tienen que reconocer no sólo los complejos peptídicos, sino también las moléculas “coestimuladoras” que no se encuentran más que en las presentadoras profesionales de antígeno. Si se producen estas etapas, las células auxiliares pueden secretar moléculas señaladoras conocidas como citocinas Th2, que contribuyen a activar las células B ligadas a los antígenos.

En el cebamiento de las respuestas T citotóxicas participan también las CPA (*recuadro inferior*). Antes de que las células citotóxicas puedan responder a los antígenos situados sobre las células inoculadas, las CPA tienen que captar los plásmidos de la vacuna, sintetizar los antígenos cifrados y exhibir fragmentos de estos antígenos en las moléculas MHC de clase I junto con moléculas coestimuladoras. A continuación, las células T asesinas tienen que reconocer esas señales y ser además tocadas por las citocinas (esta vez del tipo Th1) de las células T auxiliares. Las vacunas de ADN producen además las células T auxiliares de memoria necesarias para apoyar las actividades defensivas de otras células de memoria, lo que no queda reflejado en la ilustración. *—D.B.W. y R.C.K.*

En los ensayos de seguridad se plantean preguntas del tipo de ¿son tóxicos los plásmidos? El ADN administrado en forma de fármaco, ¿incitará una respuesta inmunitaria contra el ADN propio del organismo? Hasta la fecha no se han descubierto efectos secundarios graves, lo que resulta bastante alentador.

Este tipo de pruebas no valora el grado de prevención ni la mejoría de la enfermedad; pero en muchas de ellas se controlan los efectos de las vacunas sobre el sistema inmunológico. Según los datos preliminares, parece que podrán conseguirse respuestas inmunológicas satisfactorias. Cabe destacar que las vacunas del VIH han generado respuestas humorales y celulares; los plásmidos portadores de antígenos de *Plasmodium* han evocado respuestas inmunológicas celulares significativas; y una vacuna contra la hepatitis B ha provocado niveles de anticuerpos que deben ser lo bastante altos como para evitar la infección. Pero es probable que los enfoques genéticos tengan que combinarse a veces con estimuladores inmunológicos generalizados (coadyuvantes) para desencadenar las fuertes respuestas inmunitarias necesarias para proteger a los receptores frente a infecciones futuras, como sucede en el caso de las vacunas tradicionales.

A la vez que progresan los ensayos clínicos, en los laboratorios se intenta conocer más a fondo la forma exacta en que la inmunización génica estimula la inmunidad, en especial por parte de la rama celular del sistema de defensa, que suele resultar decisiva. Su comprensión detallada ofrecerá pistas para mejorar la eficacia.

Los inmunólogos se han enfrentado durante muchos años a una paradoja. Por un lado, era obvio que las vacunas de ADN activaban las células T asesinas. Pero la mera colocación de ADN en las células cutáneas o musculares y el hecho de inducirlas a que expusieran en sus superficies fragmentos de los antígenos codificados no deberían haber producido ese resultado. Antes de que el despliegue de esos antígenos pueda activar las células T citotóxicas, las células asesinas tienen que ser cebadas, o puestas en marcha, lo que se realiza en parte por la influencia específica de las denominadas células presentadoras de antígeno “profesionales”. Las células T tienen que unirse concretamente

a los mismos fragmentos antigénicos que detectarán en las células inoculadas y no inmunizadas (como serían las células musculares) y, a la vez, a una segunda molécula coestimuladora (o "segunda señal"), que ordinariamente no se encuentra más que en las células presentadoras de antígenos.

Se pensó durante un tiempo que no había manera de que las vacunas de ADN entraran en las células presentadoras de antígeno y, por tanto, de que sintetizaran y exhibieran los antígenos codificados por dichas vacunas. Varios descubrimientos recientes han demostrado, sin embargo, que tal opinión era equivocada. Algunos de los plásmidos entran de hecho en las células presentadoras de antígeno profesionales, las cuales exponen a continuación los antígenos junto con las moléculas coestimuladoras cruciales y ayudan a preparar las células T para la acción (*véase el recuadro*). De acuerdo con ello, para que induzcan una respuesta inmunitaria celular potente hay que administrar las vacunas de ADN de tal manera que permitan una buena captación por parte de las células presentadoras de antígenos y no sólo por los otros tipos celulares.

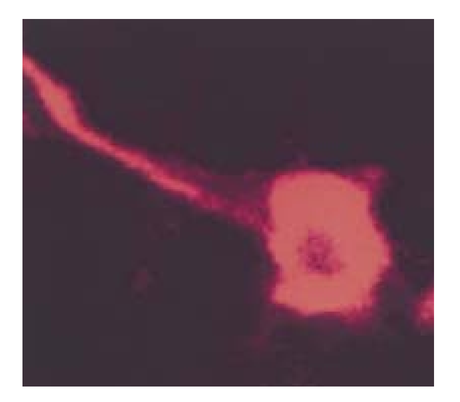
Por diferentes vías de investigación se ha llegado a la conclusión de que el ADN plasmídico que rodea a los genes antigénicos consiste en algo más que un mero vehículo liberador de genes: potencia la respuesta inmunitaria evocada por los antígenos. Este efecto procede, según parece, de la elevada frecuencia de las secuencias GC de los plásmidos. Cada hebra de la doble hélice de ADN está constituida por unidades denominadas nucleótidos que se distinguen por las bases que contienen: adenina (A), citosina (C), guanina (G) o timina (T). El ADN del plásmido, que procede de bacterias, tiene una mayor frecuencia de secuencias CG que el ADN de los vertebrados. Las unidades CG de los plásmidos bacterianos no suelen estar además metiladas, mientras que las de los vertebrados están generalmente ligadas a grupos metilo.

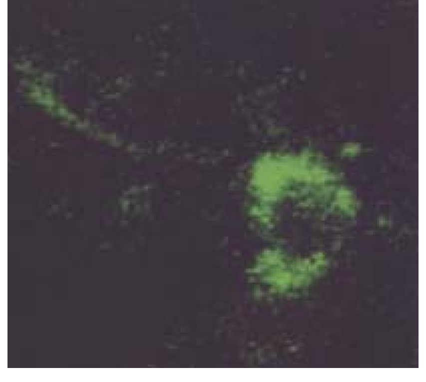
Se ha propuesto que el organismo de los vertebrados interpreta la aparición de abundantes pares CG no metilados como una señal de peligro. La respuesta consiste en que una parte relativamente primitiva del sistema inmunitario (la que no depende del reconocimiento de antígenos) intenta destruir al intruso o al menos aislarlo del organismo.

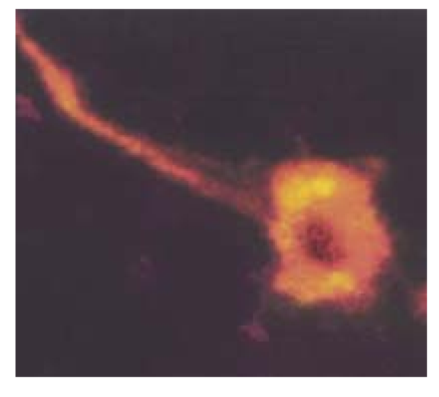
Además de analizar el comportamiento natural de las vacunas genéticas en el organismo, los inmunólogos miran al futuro y exploran ideas para incrementar la reactividad inmunológica general y mejorar la proporción de respuesta celular con respecto a la humoral. Del estudio del ADN situado en torno a las secuencias CG ha surgido una propuesta para amplificar la capacidad de respuesta. Se ha demostrado que el ADN plasmídico produce la respuesta inmunológica más potente cuando las secuencias CG están flanqueadas por dos purinas (adenina o guanina) en su lado "C" y dos pirimidinas (timina o citosina) en su lado "G". Los plásmidos que contenían esas "secuencias inmunoestimuladoras" indujeron en los ratones a los que se aplicaron una actividad de anticuerpos y de células T citotóxicas más vigorosa que otra vacuna por lo demás idéntica. El incremento del número de secuencias inmunoestimuladoras en los plásmidos bien podría amplificar la inmunogenicidad de los códigos antigénicos de una vacuna de ADN.

Otra posibilidad consiste en la incorporación a los plásmidos portadores de antígenos o a otros de genes que codificaran para las moléculas de señalización denominadas citocinas. Las células del sistema inmunitario liberan esas moléculas para regular sus propias actividades, así como la actividad de unas con respecto de otras. A modo de ejemplo, una molécula denominada factor estimulante de las colonias de granulocitos-macrófagos estimula la proliferación de las células presentadoras de antígenos, entre otros efectos. Se ha demostrado que la inclusión de sus genes estimula las respuestas generales a las vacunas de ADN.

Con objeto de asegurar que las vacunas genéticas desencadenen una respuesta celular cuando sea necesaria, se está experimentando específicamente con genes para citocinas de los cuales se sabe que promueven la actividad de las células asesinas. Se ha encontrado que las células T auxiliares, denominadas Th1, de los ratones secretan citocinas que favorecen las respuestas celulares a expensas de las humorales (anticuerpos), mientras que otras células auxiliares (las Th2) secretan citocinas que favorecen la inmunidad humoral. En los seres humanos parecen intervenir más variedad de células T auxiliares, pero un predominio de citocinas de tipo Th1 sigue promoviendo una







4. CAPTACION de vacunas de ADN por las células presentadoras de antígeno, un acontecimiento crucial en la inducción de inmunidad que se ha comprobado repetidamente. Un método consiste en añadir dos clases de marcadores a las células de un fragmento de tejido expuesto a una vacuna de ADN. Una etiqueta (*rojo, a la izquierda*) marcaba las células presentadoras de antígeno; otra (*verde, en el centro*) señalaba todas las células que sintetizaban un antígeno especificado por la vacuna. Cuando se superpusieron las imágenes de las células, la aparición de un color naranja (*derecha*) significaba la presencia de células presentadoras de antígeno que habían captado la vacuna y producido la proteína codificada por ella.

Ensayos humanos de las vacunas de ADN

En este cuadro se enumeran muchas de las pruebas sobre seres humanos conocidas por los autores. Todas las vacunas candidatas están en las primeras fases de ensayos clínicos para examinar la seguridad y las respuestas inmunitarias. Hasta ahora todas han sido bien toleradas. No se han iniciado ensayos de eficacia para la prevención o el tratamiento de las enfermedades. La mayor parte de los estudios están todavía sin terminar.

Objectivo de la vacuna	Proteínas codificadas por los genes de la vacuna	Resultados hasta la fecha
Prevención de la hepatitis B	Antígeno de superficie de la hepatitis B	Respuestas humoral y celular
Prevención del herpes simple	Glucoproteína del herpes	Análisis inmunológico en marcha
Prevención del VIH	Proteínas reguladoras y de la cubierta; proteínas y enzimas nucleares que intervienen en la replicación del VIH	Respuestas celulares (en última instancia se probarán probablemente todos los genes en una sola vacuna)
Prevención de la gripe	Hemaglutinina	Análisis inmunológico en marcha (ensayo concluido)
Prevención del paludismo	Proteína del circunsporozoito	Respuestas celulares
Tratamiento del VIH	Proteínas reguladoras y de la cubierta; proteínas tat, nef y reguladoras	Respuestas humorales en el primer ensayo de la lista (que ha acabado); respuestas celulares en otro ensayo
Tratamiento del VIH	Proteínas y enzimas de la cubierta, reguladoras y nucleares que intervienen en la replicación del VIH	La vacuna se combinó con tratamiento farmacológico agresivo (HAART); análisis inmunológico en marcha
Tratamiento de los adenocarcinomas de mama y de colon	Antígeno carcinoembrionario (ACE)	Respuestas celulares
Tratamiento de linfomas de células B	Inmunoglobulina	Respuestas humorales
Tratamiento de linfoma cutáneo de células T (LCT)	Receptor de células T	Análisis inmunológicos en marcha (el ensayo ha acabado)
Tratamiento del cáncer de próstata	Antígeno de membrana específico de la próstata	Análisis inmunológicos en marcha

respuesta celular, mientras que la preponderancia de citocinas de tipo Th2 estimula la respuesta humoral.

Se ha demostrado que una vacuna que contenía genes para los antígenos del VIH y para la interleucina-12 (una citocina Th1 clásica) redujo la producción de anticuerpos anti-VIH en los ratones e intensificó notablemente la capacidad de respuesta de las células T citotóxicas a los antígenos del VIH. Esta inclinación hacia la respuesta celular es particularmente alentadora, pues, según los descubrimientos recientes relativos al VIH, una potente respuesta de células T asesinas frente al VIH es de importancia fundamental para combatir su replicación.

También podrían incorporarse genes para sustancias conocidas como quimiocinas. Se trata de moléculas pequeñas que atraen a la vez a células presentadoras de antígenos y a células T hacia los tejidos lesionados o infectados. Como las citocinas, las quimiocinas difieren en cuanto a la mezcla de células en las que actúan y a los efectos precisos que ejercen. Dado que se entienden mejor sus acciones individuales, la combinación cautelosa de genes de quimiocinas específicas con genes de citocinas seleccionadas podría constituir un gran paso hacia la combinación a medida del tipo y el grado de las respuestas inmunológicas desencadenadas.

En teoría las vacunas de ADN podrían incluso evitar la necesidad de las clásicas células presentadoras de antígenos para cebar las células T citotóxicas. Si se reunieran un gen que especificara un antígeno con un gen para una molécula coestimuladora normalmente sintetizada por una célula presentadora de antígenos, las células cutáneas, las musculares o cualesquiera otras que fueran inoculadas desplegarían ellas mismas el antígeno y la "segunda señal" crucial, facilitando con ello a la vez el cebamiento y la activación de las células T citotóxicas.

Si las vacunas genéticas de primera generación funcionaran bien en los ensayos clínicos, quizá puedan combinarse inicialmente con las vacunas más tradicionales para conseguir aún mejores efectos. Digamos, por ejemplo, que una vacuna subunitaria (que consiste en una proteína) evocara una buena respuesta de anticuerpos contra un patógeno, pero que se necesitara también una respuesta celular. Entretanto una nueva vacuna de ADN quizá demuestre ser capaz de inducir una respuesta celular, pero no de excitar una respuesta de anticuerpos ideal. El método denominado cebamiento-estímulo permitiría a los médicos administrar la vacuna de ADN y luego estimular la respuesta de anticuerpos mediante la administración tardía de la vacuna subunitaria. A medida que los fabricantes de vacunas aprendan a optimizar las respuestas a la inmunización genética (por ejemplo, utilizando las técnicas que se acaban de describir), quizá sea posible conseguir finalmente los efectos necesarios sólo con vacunas genéticas.

Mientras se consideran las posibilidades excitantes y futuristas de la

inmunización genética, quienes nos dedicamos al tema tenemos también que arremangarnos y ponernos manos a la obra para resolver una gran cantidad de detalles. Por ejemplo, la mayoría de las vacunas de ADN deja de producir proteínas en abundancia aproximadamente después de un mes. Si se encontrara una forma de prolongar la supervivencia del plásmido, ¿se induciría con ello una inmunidad más fuerte? ¿Saldría el tiro por la culata y se estimularían los ataques contra el tejido sano no vacunado? ¿Cuánto dura la inmunidad en los seres humanos? ¿En qué medida varían las respuestas de unas personas a otras? ¿Qué dosis son más eficaces y qué tipos de regímenes de administración son los mejores? También necesitamos saber qué sustancias son más útiles para dirigir específicamente el material genético a células concretas (entre ellas, las células presentadoras de antígeno) y para intensificar la captación celular de plásmidos. ¿Qué genes de un patógeno dado hay que seleccionar, a veces entre millares de ellos, para conseguir la potencia máxima?

Los ensayos clínicos que pretenden responder a estas preguntas y evaluar la eficacia de la primera generación de vacunas de ADN no finalizarán hasta dentro de cinco o diez años. Lleguen o no al mercado esas versiones específicas, es probable que las técnicas desarrolladas para la inmunización genética resulten muy valiosas para investigar la biología básica de la respuesta inmunitaria y para diseñar vacunas aún mejores.

Los investigadores que actualmente proyectan las vacunas suelen tener poca idea de qué componentes del sistema inmunitario tienen que ser activados con más intensidad contra un patógeno dado y qué antígenos y otras sustancias permitirán esa estimulación. Pero sí pueden mezclar fácilmente y emparejar los genes antigénicos y los de otras moléculas (como los que codifican las citocinas y las quimiocinas) en vacunas de ADN experimentales y comparar con bastante rapidez el éxito de las diferentes combinaciones en animales pequeños. Es así como podrán controlar a la vez las respuestas inmunitarias que son necesarias para la protección y los antígenos y demás proteínas que puedan generarlas.

Como resultado de estas pruebas se están creando "bibliotecas" de todos los genes de los microorganismos patógenos, estando cada gen inserto en su propio plásmido. Subconjuntos de estas bibliotecas se administran luego a animales, que son expuestos también al patógeno vivo, identificándose así los subtipos que funcionan mejor. Se subdividen los grupos y se vuelven a realizar pruebas, hasta obtener la mezcla de antígenos más útil.

La manipulabilidad inherente al ADN lo convertirá con el tiempo en el vehículo fundamental para desmenuzar las complejas respuestas inmunitarias del organismo a los diferentes agentes causantes de enfermedad. Al disponer de esa información, quienes proyecten las vacunas podrían canalizar las respuestas inmunitarias por vías seleccionadas. Hasta ahora no había forma de realizarlo de manera fácil y barata, pero es probable que vacunas de este tipo, "racionalmente" diseñadas, proporcionen en el futuro nuevas inmunoterapias para el cáncer, así como formas potentes de prevenir y de mitigar todas esas infecciones diabólicas que eluden los esfuerzos de la humanidad para evitarlas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HETEREOLOGOUS PROTECTION AGAINST INFLUENZA BY INJECTION OF DNA ENCODING A VIRAL PROTEIN. J. B. Ulmer y cols., en *Sciencie*, vol. 259, páginas 1754-1749; 19 de marzo, 1993.

PROTECTION AGAINST MYCOPLASMA INFECTION USING EXPRESSION-LIBRARY IMMUNIZATION. M. A. Barry, W. C. Lai y S. A. Johnston en *Nature*, vol. 377, páginas. 632-635; 19 de octubre, 1995.

IMMUNOSTIMULATORY DNA SEQUENCES FUNCTION AS T HELPER-I-PROMOTING ADJUVANTS. Mark Roman y cols. en *Nature Medicine*, volumen 3, n.º 8, págs. 849-854; agosto de 1997.

MODULATING THE IMMUNE RESPONSE TO GENETIC IMMUNIZATION. Adam D. Cohen, Jean D. Boyer y David B. Weiner en *FASEB Journal*, vol. 12, n.º 15, págs. 1611-1626; diciembre de 1998.

NEUTRALIZING ANTIBODY-INDEPENDENT CONTAINMENT OF IMMUNODEFICIENCY VIRUS CHALLENGES BY DNA PRIMING AND RECOMBINANT POX VIRUS BOOSTER IMMUNIZATIONS. Harriet L. Robinson y cols. en *Nature Medicine*, vol. 5, n.º 5, págs. 526-534; mayo de 1999.

El misterioso espín de los nucleones

Una nueva tanda de experimentos contribuirá a que se conozca mejor la enigmática estructura interna de los protones y los neutrones

Klaus Rith y Andreas Schäfer

El protón y el neutrón fueron dos de las primeras partículas subatómicas descubiertas en este siglo. Reciben el nombre de nucleones porque residen en el núcleo de los átomos. Constituyen más del 99,9 % de la materia corriente; el 0,1 % restante son electrones. Aunque ochenta años de estudios experimentales y de análisis teóricos nos hayan enseñado mucho sobre los nucleones, sus propiedades fundamentales siguen albergando enigmas y sorpresas. Durante los últimos años los físicos se han esforzado en resolver un caso particularmente difícil: la denominada "crisis del espín".

La crisis surgió del éxito que acompañó al modelo de los quarks a la hora de interpretar las partículas subatómicas. Los físicos teóricos lo desarrollaron hasta convertirlo en una descripción ordenada y compacta de la miríada de nuevas partículas detectadas en los años cincuenta y sesenta, dando también cabida en él a viejos conocidos como el protón y el neutrón. Las propiedades y los influjos recíprocos de las partículas de este zoo se explicaron suponiendo que estuvieran constituidas por tan sólo tres especies de quark, llamadas arriba, abajo y extraño.

Un protón consiste en dos quarks arriba y un quark abajo, mientras que un neutrón está formado por un quark arriba y dos abajos. Muchas propiedades de los nucleones se pueden derivar de forma sencilla combinando las propiedades de sus quarks constituyentes. Por ejemplo, la carga eléctrica de un protón es exactamente la suma de las cargas fraccionarias de sus quarks: $+1 = {}^2/_3 + {}^2/_3 - {}^1/_3$. No obstante todos los intentos de observar quarks individuales fracasaron y muchos físicos consideraban a estas partículas como simples convenciones matemáticas, como un sistema de clasificación conveniente para describir interacciones, pero no como objetos "reales" susceptibles de estudio.

Físicos del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) colaboraron a finales de los años sesenta en el estudio de la estructura interna de los nucleones, haciendo pasar un haz de electrones de gran energía a través de hidrógeno líquido. Como el núcleo de hidrógeno está formado por un solo protón, este procedimiento es casi tan eficaz como el disparo de electrones contra protones puros. Los detalles de las dispersiones de los electrones permiten deducir la estructura del protón.

Aunque ya se habían realizado experimentos similares con anterioridad, todos ellos habían revelado que el protón era una burbuja de carga esférica y "blanda". Ante la sorpresa de todos, las altas energías accesibles al acelerador SLAC revelaron que algunos electrones se dispersaban, como si estuvieran chocando con puntos de carga duros y muy pequeños contenidos en el interior de los protones. Los experimentadores pensaron inicialmente que habían cometido algún error o que habían pasado por alto algún efecto sutil. Pero los resultados eran correctos: se trataba de las primeras pruebas de que los quarks eran objetos reales.

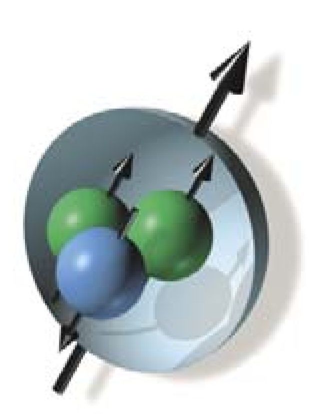
En la actualidad sabemos que los nucleones contienen partículas evanescentes en una danza incesante, que las hace oscilar entre la existencia y la nada. Algunas de ellas son gluones, las partículas que producen la interacción fuerte. Los tres quarks que constituyen un nucleón —denominados quarks de valencia— intercambian gluones entre sí, lo que asemeja una unión mediante un pegamento fuerte y elástico [*véase* "Glubolas", por Frank E. Close y

KLAUS RITH y ANDREAS SCHÄFER son miembros del proyecto HERMES. Rith es catedrático de física de partículas de la universidad alemana de Erlangen-Nuremberg. Estudia las colisiones leptón-nucleón desde 1974, cuando finalizó su doctorado sobre el diseño y construcción de un detector que se usaría con un sincrotón de electrones en la Universidad de Bonn. Ha trabajado en los experimentos de colisión muón-nucleón del CERN y ha sido el portavoz del proyecto HERMES durante varios años. Schäfer empezó a trabajar en la teoría del espín de los nucleones durante su primer posdoctorado en el Instituto de Tecnología de California, en 1987. En los albores de la "crisis del espín" se enteró de que un grupo de investigación localizado en el mismo edificio estaba desarrollando un blanco polarizado y que "necesitaba un físico teórico para mantenerlos al corriente de la gran cantidad de artículos teóricos que se estaba generando". Schäfer es catedrático de la universidad alemana de Ratisbona, donde lidera un grupo de investigación en cromodinámica cuántica y física de altas energías.

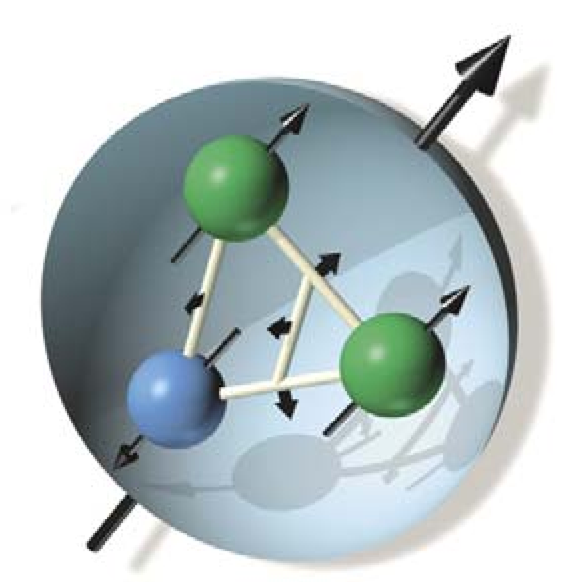
Cuatro representaciones de un protón

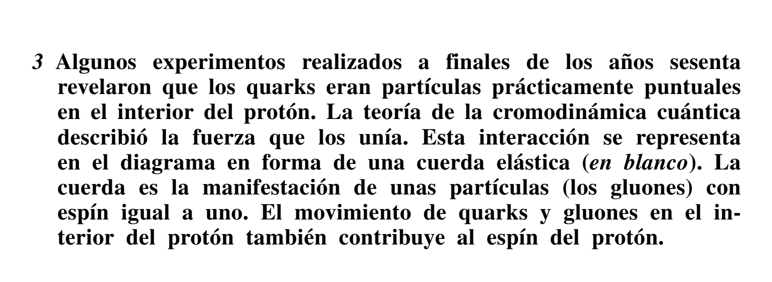


1 **A baja resolución el protón se asemeja a una burbuja “blanda” de unos 2×10^{-15} metros de diámetro (*bola gris*), con una carga igual a +1 y un momento angular, o espín, igual a $^1/_2$ (*flecha*). La flecha se encontraría sobre el eje de giro de un objeto en rotación, de forma que un observador situado en su punta viese que el objeto da vueltas en sentido horario. Las partículas cuánticas tienen un espín intrínseco de valor fijo, que no se puede interpretar como una rotación ordinaria.**

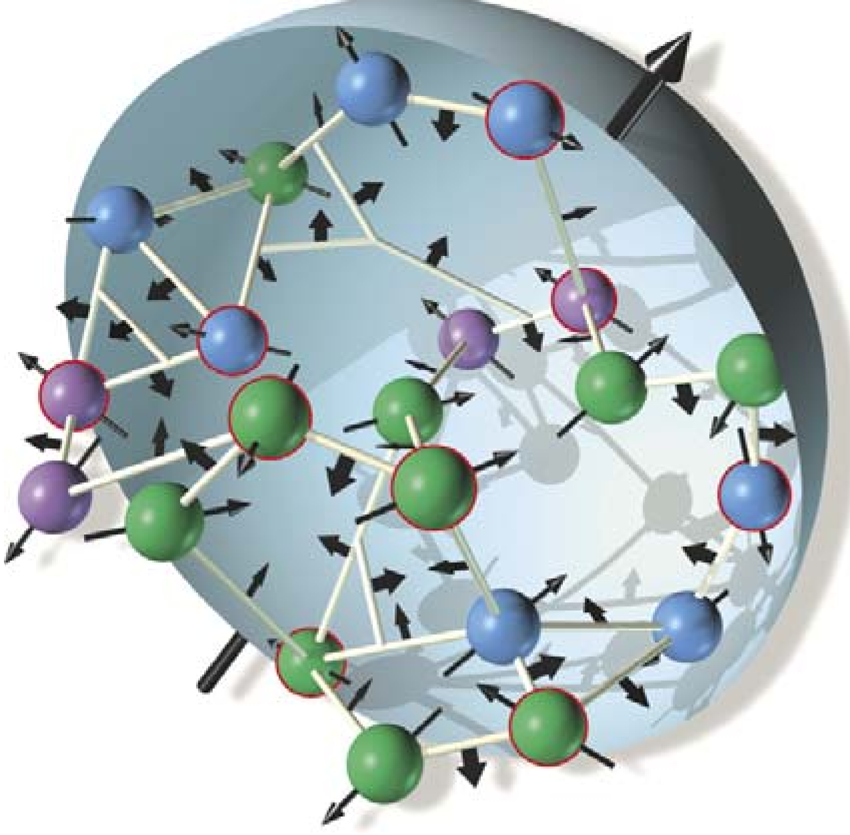


2 **El modelo de quarks describe al protón como la suma de dos quarks arriba (*en verde*) y un quark abajo (*en azul*), cuyos espines y cargas características determinan las propiedades del protón. Cada quark tiene un espín de $^1/_2$, pero el espín total también tendrá la misma magnitud si dos espines de los quarks se orientan de forma antiparalela y se cancelan.**

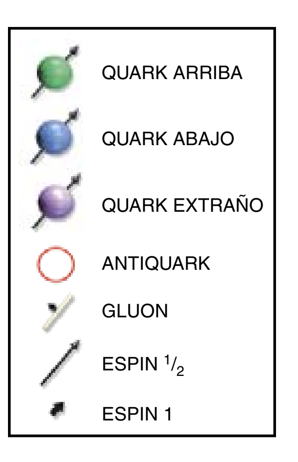


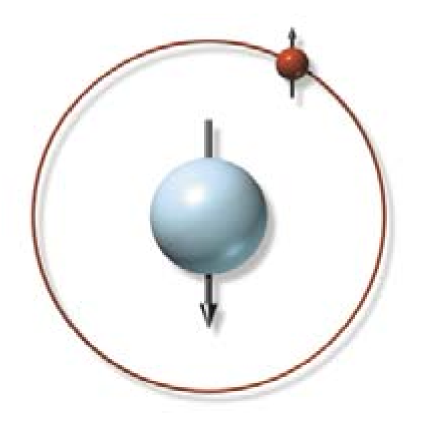


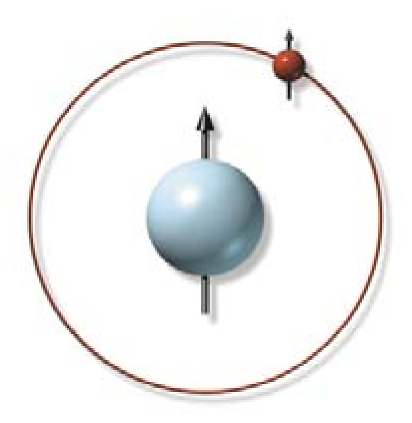
3 **Algunos experimentos realizados a finales de los años sesenta revelaron que los quarks eran partículas prácticamente puntuales en el interior del protón. La teoría de la cromodinámica cuántica describió la fuerza que los unía. Esta interacción se representa en el diagrama en forma de una cuerda elástica (*en blanco*). La cuerda es la manifestación de unas partículas (los gluones) con espín igual a uno. El movimiento de quarks y gluones en el interior del protón también contribuye al espín del protón.**

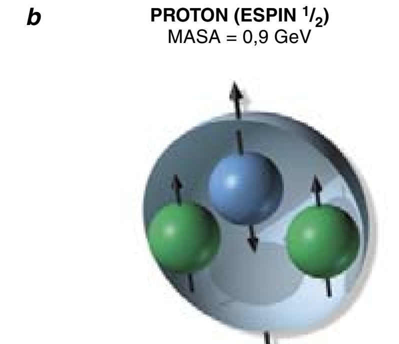


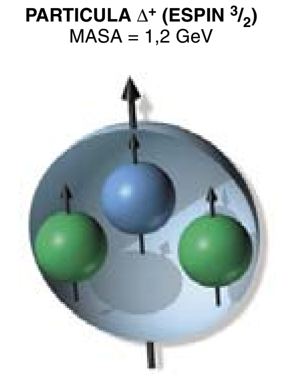
4 **La representación cuántica completa que realiza la cromodinámica cuántica incluye una danza vacilante y complicada de quarks y antiquarks virtuales (*resaltados en rojo*), que incluye quarks extraños (*en añil*) que no suelen formar parte de la materia ordinaria. El diagrama muestra una instantánea de una configuración particular, que sólo da una pista de cómo pudieran ser las indeterminaciones cuánticas y las fluctuaciones dinámicas completas. Los experimentos van revelando poco a poco los detalles de cómo esta danza produce el espín del protón, algo que aún es demasiado difícil de calcular con exactitud.**











1. LA ESTRUCTURA DEL ESPIN tiene efectos más importantes en las partículas subatómicas que en los átomos. La alineación de los espines del protón (*en gris*) y del electrón (*en rojo*) de un átomo de hidrógeno (*a*) incrementa el espín total del átomo de cero a uno, pero sólo aumenta su masa en unas pocas partes por millón de electrón-volt. El protón y la partícula Δ^+ (*b*) consisten en dos quarks arriba y uno abajo, no difiriendo más que en el espín, pero esto hace que la partícula Δ^+ sea un 30 % más pesada que el protón.

Philip R. Page; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 1999]. Además de los tres quarks de valencia y de los gluones, en el interior de protones y neutrones se materializan y desaparecen efímeros pares de quarks “virtuales”, que contribuyen a las propiedades del nucleón (*véase el recuadro de la página anterior*).

El espín, una forma característica de momento angular, es una propiedad muy importante. Todas las partículas que constituyen un nucleón tienen espín; el espín total observado de un nucleón tiene que resultar de cierta adición entre los espines de estos derviches giróvagos. A primera vista, el modelo nucleónico de los tres quarks parece dar cuenta de su espín de una forma sencilla: dos de los quarks tendrían espines opuestos, que se cancelarían, y el espín del quark restante produciría el espín observado. Sería razonable suponer que todos los gluones y los pares virtuales de quarks y de antiquarks tuvieran una contribución nula al espín total. Pero la realidad no es tan sencilla.

Los resultados experimentales indicaron a mediados de los años ochenta que los espines de los quarks de valencia no contribuían esencialmente al espín del nucleón. Este resultado sorprendente provocó la “crisis del espín” y promovió una intensa investigación teórica para reconciliar teoría y experimentos. Otro resultado sorprendente fue que los quarks extraños, que se solían relegar al dominio de las partículas exóticas efímeras y a las interacciones de altas energías, parecían desempeñar un papel importante en la estructura del momento angular de los nucleones ordinarios.

Los físicos teóricos creen conocer ya cómo se producen estas características. Los experimentos están entrando en una nueva etapa, en la que diversos laboratorios de Europa y de Estados Unidos sondean la estructura del espín de los nucleones con nuevas técnicas y con mayor precisión. Aún resta por ver si los resultados confirmarán los conocimientos actuales o generarán nuevos misterios... y nuevas crisis.

La importancia del espín

Cualquier objeto que gira o que se mueve alrededor de un punto fijo tiene momento angular. La Tierra, por ejemplo, tiene un momento angular orbital por su movimiento anual alrededor del Sol y un momento angular intrínseco por su rotación diaria alrededor de su eje. El espín de una partícula elemental correspondería a un momento angular intrínseco, pero tiene propiedades cuánticas especiales. La mecánica cuántica obliga a que el espín no pueda adoptar más que valores múltiplos de una pequeña cantidad fundamental llamada “cuanto de acción de Planck”, $\hbar$ (se lee “hache barra”).

Sólo están permitidos múltiplos enteros y semienteros de esta cantidad. Las partículas materiales más conocidas —electrones, protones, neutrones y quarks— tienen el espín no nulo más pequeño posible, $\hbar/2$. Suele decirse que tienen espín $^1/_2$.

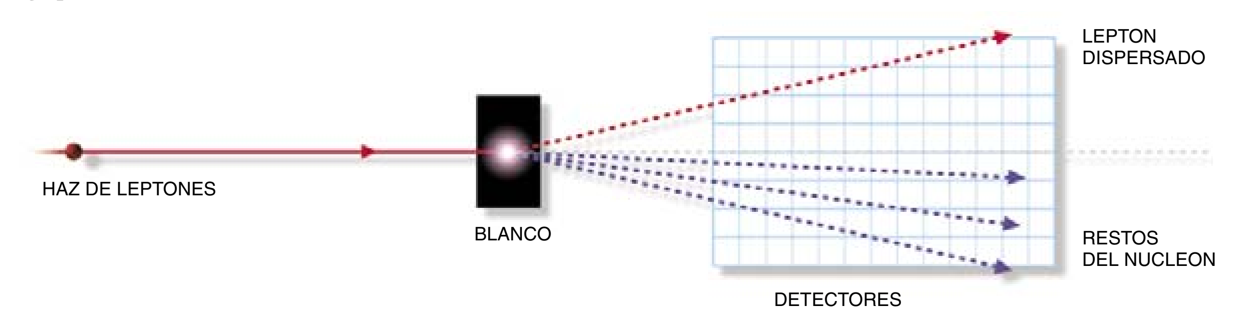
El espín es esencial para determinar cómo se comporta una partícula. Por ejemplo, si los electrones tuvieran cualquier espín diferente de $^1/_2$, su distribución en orbitales alrededor del átomo se alteraría de forma radical. La tabla periódica de los elementos y toda la química se volverían irreconocibles.

Calcular el espín de una partícula compuesta sumando los momentos angulares de sus componentes no es tan simple como sumar cargas eléctricas, puesto que cada momento angular tiene asociada una orientación. La orientación del momento angular terrestre, por ejemplo, se representa como una flecha situada a lo largo del eje de nuestro planeta, apuntando en dirección norte.

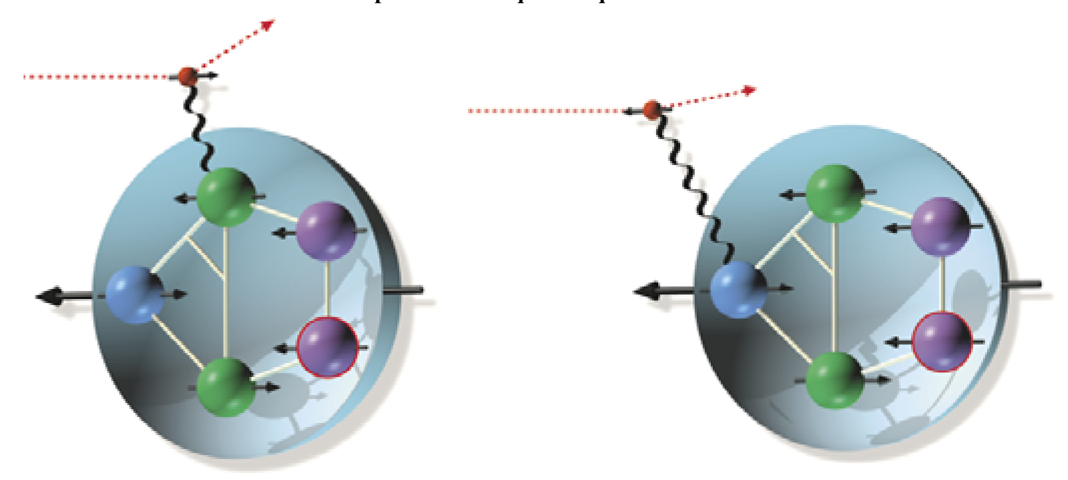
Calcular estas sumas en el caso de un átomo es algo que se sabe bien cómo hacerlo, aunque el átomo tenga docenas de electrones. Es el tipo de tarea que los estudiantes de física resuelven en los cursos de mecánica cuántica. Pero desgraciadamente nadie ha conseguido hacer los cálculos correspondientes a los gluones y los quarks que integran los protones y neutrones.

La estructura del espín nucleónico

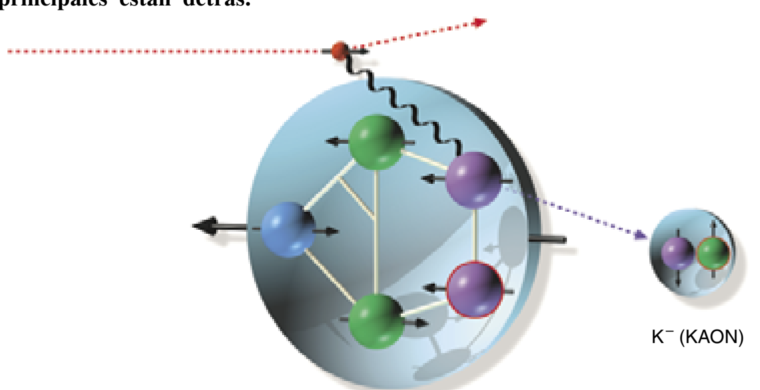
Un acelerador dirige un haz de electrones o de muones polarizados ("leptones") hacia un blanco de nucleones también polarizados. Los detectores miden las desviaciones resultantes y las pérdidas de energía de los leptones. Los experimentos recientes también analizan los restos de los nucleones en busca de pistas sobre qué tipo de quark fue el golpeado en cada desviación concreta.

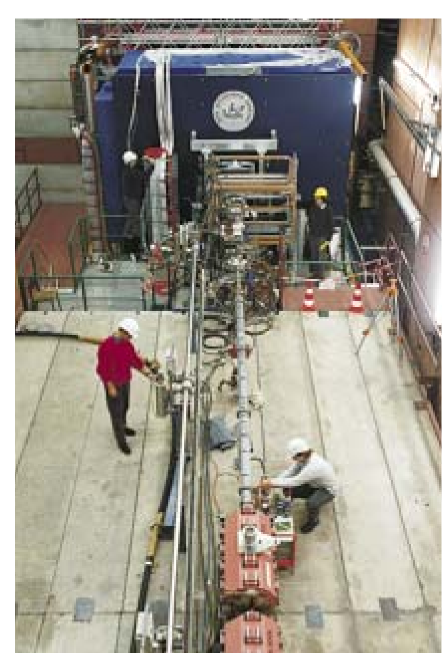


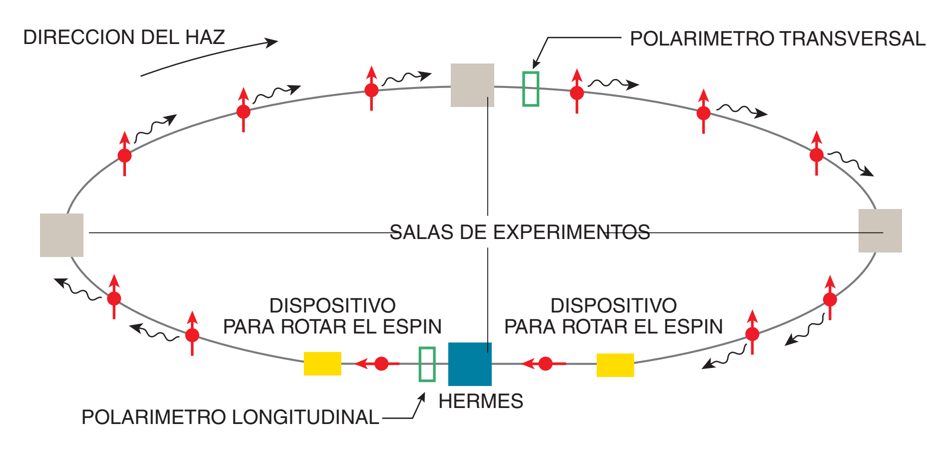
Un leptón se desvía cuando intercambia un fotón con uno de los quarks del nucleón. Los leptones con espines alineados en la dirección del haz interactúan casi exclusivamente con quarks de espín opuesto (*diagrama inferior izquierdo*). Cuando se invierte la polarización del haz (o la del nucleón) (*diagrama inferior derecho*), los leptones interactúan con quarks diferentes, cambiando el patrón de ángulos de dispersión y las pérdidas de energía observadas. La diferencia revela la asimetría de los espines de los quarks que forman el nucleón.



Si un impacto de gran energía "arranca" un kaón negativo del nucleón (*diagrama inferior izquierdo*), es probable que el fotón haya golpeado a uno de sus constituyentes —un quark extraño o un antiquark arriba—. Los físicos determinan la polarización de estos quarks contando las desviaciones correspondientes de los leptones. En el experimento HERMES (*en la fotografía*), el haz de electrones viaja a lo largo de la conducción gris hacia el imán del espectrómetro (*en azul*). El blanco y algunos detectores pequeños se sitúan delante del imán; los detectores de partículas principales están detrás.







2. EL COLISIONADOR HERA acelera electrones en un anillo de almacenamiento de 6,3 kilómetros de longitud. Los electrones (*en rojo*) dan unas 47.000 vueltas por segundo en su interior, emitiendo rayos X de alta energía (*en negro*), la llamada radiación de sincrotón. En unos 30 minutos esta radiación polariza gradualmente los espines de los electrones (*flechas rojas*) en la dirección perpendicular al haz (en el gráfico se representa una polarización del 100 %, pero lo usual es obtener un 60 %). El blanco y los detectores del HERMES (*en azul*) comparten el haz del HERA. Imanes especiales (*en amarillo*) hacen girar la polarización para que se sitúe en la misma dirección del haz antes de alcanzar el punto de colisión del HERMES, volviendo a girarla luego hasta la posición perpendicular. Los polarímetros permiten hacer un seguimiento de la polarización.

Problemas de la cromodinámica cuántica

El problema reside en la teoría que describe la interacción fuerte, llamada cromodinámica cuántica. Sus ecuaciones se conocen desde los años setenta, pero tienen varias características que las hacen muy difíciles de manejar. Incluso hoy en día, con las técnicas matemáticas más refinadas y los computadores paralelos más potentes, los físicos no pueden resolver exactamente las ecuaciones de un nucleón.

La interacción fuerte surge del intercambio de gluones entre los quarks. El proceso es parecido al que produce la fuerza electromagnética, que consiste en el intercambio de fotones entre partículas eléctricamente cargadas. Pero hay dos diferencias cruciales que convierten las matemáticas de la cromodinámica cuántica en mucho más difíciles de manejar que las del electromagnetismo. En primer lugar, los fotones no tienen carga eléctrica, de forma que no “perciben” a los demás fotones de forma directa, mientras que los gluones interactúan entre sí. En segundo lugar, la interacción fuerte es cien veces más intensa que la electromagnética (de ahí su nombre). En el caso de una interacción débil, como la electromagnética, los procesos más simples son los que tienen los efectos más importantes, no teniéndose en cuenta los más complicados más que cuando se quiere aumentar la precisión. Pero en el caso de la interacción fuerte puede que haya contribuciones importantes de procesos muy complicados, que implican interacciones múltiples, no habiendo maneras sencillas de tratar la matemática resultante.

La verdad es que estas interacciones entre gluones convierten a la cromodinámica cuántica en una teoría “no lineal”: un pequeño cambio de las condiciones puede provocar efectos importantes. Las dinámicas no lineales constituyen la base de las teorías del caos; los numerosos estudios de sistemas caóticos realizados en los últimos años han mostrado lo complejas que pueden ser. La cromodinámica cuántica es además una teoría cuántica de campos, lo que implica que se crean y se aniquilan quarks y gluones virtuales constantemente. También hay que tener en cuenta las interacciones breves, pero generalizadas, de estas partículas. Y, por si no fuera poco, el principio de incertidumbre establece que los quarks, que están confinados en el pequeño volumen de un protón o de un neutrón, tengan que permanecer en movimiento a una velocidad cercana a la de la luz.

En ciertos aspectos el espín es más importante en la cromodinámica cuántica que en la física atómica. Por ejemplo, un átomo de hidrógeno puede tener espín igual a cero o a uno, en función de que el protón y el electrón orbital tengan sus espines paralelos o antiparalelos entre sí (*véase la figura 1*). Pero la diferencia de energía entre ambas alternativas es pequeña. En cambio, consideremos la partícula Δ^+ (delta más, el signo indica que la carga eléctrica es igual a +1). Esta partícula está formada por los mismos quarks que el protón, pero sus espines suman $^3/_2$ en vez de $^1/_2$. La partícula Δ^+ es un 30 % más masiva que un protón, lo que implica que mantener los espines alineados requiere más energía.

“Microscopios” de leptones

Los físicos experimentales suelen investigar la estructura de los nucleones bombardeándolos con haces de partículas de mucha energía, electrones o muones. (El muón es una partícula parecida al electrón, pero más pesada e inestable.) A estas partículas, llamadas leptones, no les afecta la interacción fuerte, por lo que las colisiones sólo se rigen por efectos electromagnéticos. Es más, los leptones parecen comportarse como puntos ideales, sin dimensión. La matemática de sus interacciones con los nucleones se simplifica así enormemente y se comprende muy bien. Las complicaciones se circunscriben a la estructura del nucleón, sin afectar a la partícula de prueba.

Cuando un electrón o un muón pasan cerca de un protón o de un neutrón del blanco, sienten una fuerza debida a las cargas eléctricas de dicho nucleón. En el lenguaje de la teoría cuántica de campos, el leptón y el nucleón intercambian un fotón, transfiriéndose energía del uno al otro y provocando la desviación del primero (*véase el recuadro de la página anterior*). Los investigadores pueden representar la distribución de las cargas en el interior del nucleón —las cargas de los quarks— midiendo cuidadosamente las desviaciones y las pérdidas de energía producidas por estas colisiones.

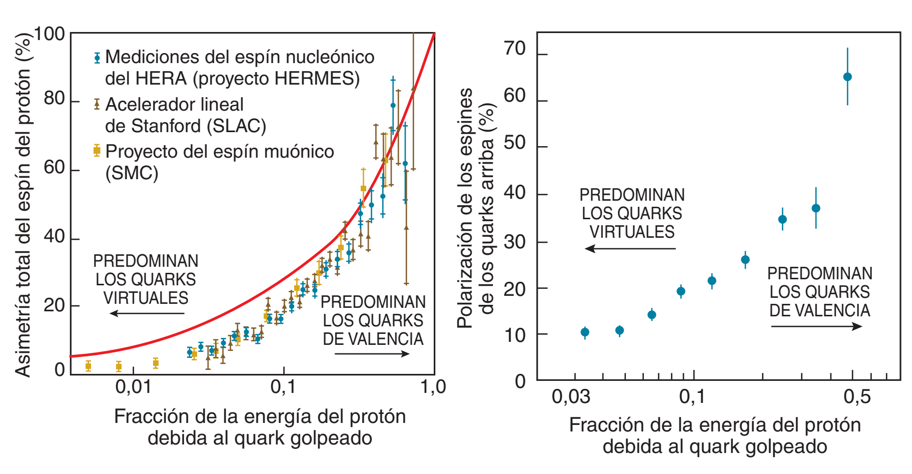
La combinación de acelerador (que incrementa la velocidad de los leptones) y detector (que atrapa a los leptones desviados por el blanco) actúa como un microscopio gigantesco. A medida que se incrementa el momento de los fotones transferidos, este microscopio examina la estructura del nucleón con mayor detalle. Un leptón suele requerir una energía de 100 gigaelectrón-volt (GeV) para

mostrar detalles con una precisión del orden de la centésima parte del tamaño del nucleón. (El GeV es la unidad de energía que se suele utilizar en física cromodinámica cuántica; es aproximadamente igual a la masa de un protón o de un neutrón en reposo.)

Cuando se estudia la estructura del espín de los nucleones, los espines tienen que estar polarizados (es decir, alineados), tanto los de las partículas del blanco como los de las del haz incidente. La interacción básica entre el leptón y el quark del blanco sigue consistiendo en el intercambio de un fotón, pero con una particularidad: si el momento angular del haz de leptones apunta en la misma dirección que éste, los leptones intercambiarán fotones fundamentalmente con los quarks de espín opuesto. Es así como las desviaciones de los leptones informan a los físicos experimentales de la manera en que se distribuyen en el interior del nucleón los quarks que tienen determinada orientación del espín. Las mediciones que se realizan primero con determinada polarización del haz incidente y luego con la opuesta (ya sea del haz o del blanco) revelan en concreto la asimetría de los espines de los quarks, el desequilibrio entre espines paralelos y antiparalelos.

El primero de estos experimentos de polarización se llevó a cabo en el SLAC a finales de los años setenta, utilizando un haz de electrones y un blanco criogénico de butanol (C_4H_9OH). Los resultados, publicados a principios de los ochenta, coincidieron con las predicciones de que cerca de un 60 % del espín del protón procede de sus quarks, con una contribución muy escasa de los quarks extraños. Pero los datos estaban limitados por las energías relativamente bajas del haz de electrones del SLAC (de 10 a 20 GeV) y las conclusiones dependían de que la extrapolación a mayores energías fuera aceptable.

Los físicos del Proyecto Europeo del Muón (EMC) empezaron a experimentar a mediados de los años ochenta en el CERN con un haz de muones de 200 GeV y un blanco polarizado de amoníaco sólido (NH_3). El haz de protones procedente del acelerador crea primero un haz de piones de alta energía, que se desintegran en vuelo, dando lugar a muones polarizados en un 80-90 por ciento. Pero la intensidad del haz de muones resultante es casi un



3. LA POLARIZACION DEL ESPIN del protón se ha medido en muchos experimentos. La asimetría de espín total medida recientemente por el SLAC, el SMC y el HERMES (*diagrama de la izquierda*) muestra que los espines de los quarks no contribuyen más que a una pequeña parte del espín del protón. Si los datos se hubieran ajustado a la curva, habrían indicado una contribución mayor, tal como se esperaba a principios de los años ochenta. El HERMES midió recientemente la polarización particular del espín de los quarks y antiquarks arriba (*diagrama de la derecha*).

millón de veces menor que la del haz de electrones polarizados del SLAC. Para compensar esta limitación, los blancos criogénicos del EMC tienen un tamaño de 72 centímetros. Con un blanco menor no se producirían suficientes interacciones entre muones y protones polarizados del amoníaco para producir resultados precisos.

El grupo del CERN exploró la estructura del espín del protón a energías más altas y realizó el sorprendente descubrimiento de que los espines de los quarks de valencia contribuyen muy poco al espín del protón. También parecía probable que los quarks extraños virtuales del interior del protón estuvieran bastante polarizados y que contribuyeran de una forma insospechadamente importante al espín total: cerca de un 10 por ciento, aunque en la dirección equivocada.

Los avances técnicos extraordinarios que se realizaron pocos años más tarde permitieron haces y blancos muy polarizados y condujeron a nuevas series de experimentos mucho más precisos. Además de talento técnico, todo esto implicaba una organización a gran escala del trabajo y de los recursos. El Proyecto del Espín Muónico (SMC) tomó posesión de los primeros aparatos del CERN, sustituyéndolos por un blanco de 1,2 metros (el mayor nunca construido) formado de deuterio (hidrógeno con un neutrón adicional en el núcleo). También empezaron nuevos experimentos en el SLAC, utilizando para los blancos materiales que contenían hidrógeno, deuterio y helio 3. El helio 3 está formado de un solo neutrón y dos protones con espines opuestos, que se cancelan. Los experimentos con deuterio y helio 3 proporcionan datos muy importantes sobre la estructura del espín del neutrón, que tiene que estar estrechamente relacionado con el del protón.

HERMES y más allá

Un proyecto internacional en el que participó Klaus Rith, uno de los autores de este artículo, propuso en 1998 la adaptación del colisionador de electrones y protones HERA del Sincrotón Alemán de Electrones (DESY) para realizar mediciones del espín nucleónico. El grupo pasó a llamarse HERMES. Los electrones efectúan unas 47.000 revoluciones por segundo en el anillo del HERA, produciendo un haz que, en promedio, es unas 10.000 veces más intenso que el del SLAC (*véase la figura 2*). Este haz intenso se puede utilizar con blancos gaseosos de baja densidad, formados por hidrógeno atómico puro, deuterio o helio 3. Estos tipos de blancos evitan la "disolución" de espín que se da en los blancos de butanol y de amoníaco, los cuales contienen varios pares protón-neutrón no polarizados en sus átomos de carbono, nitrógeno y oxígeno.

Pero se tenían que superar serias dificultades técnicas. Se necesitaron cuatro años de trabajo para que

los técnicos del acelerador DESY y los miembros del proyecto HERMES consiguieran niveles de polarización elevados y luego los obtuvieran de forma rutinaria. Fue el momento en que HERMES recibió el visto bueno definitivo y se construyeron e instalaron los detectores. HERMES empezó a obtener datos en el verano de 1995.

Los resultados de todos los experimentos de la segunda generación son consistentes entre sí (*véase la figura 3, derecha*) y confirman que sólo un 30 % del espín del protón procede del espín de sus quarks. Es más, los experimentos están empezando a determinar la contribución de cada tipo de quark a través del estudio de los restos de nucleones que se producen en cada colisión. En la parte derecha de la figura 3 se muestran los resultados recientes del HERMES sobre la distribución de quarks arriba polarizados. HERMES también proporcionará las primeras mediciones *directas* de la polarización de los quarks extraños, seleccionando aquellas colisiones que dan lugar a un kaón negativo (que consiste en un quark extraño y un antiquark arriba).

El 70 % restante del espín ya no constituye ninguna crisis. Puede proceder de los espines de los gluones (cada gluón tiene un espín igual a uno) y del momento angular orbital producido por el movimiento de todos los quarks y gluones situados en el interior del nucleón. Los modelos teóricos actuales de la estructura del espín coinciden con los datos experimentales siempre que la contribución de los gluones sea de entre una y dos unidades cuánticas de espín. También exigen que el momento orbital angular (debido al movimiento de todas las partículas del nucleón) sea igual a –1.

Parece contrario al sentido común que estas cantidades tan elevadas de momento angular estén presentes en el interior de un nucleón cuyo espín total es igual a $^1/_2$. ¿Podemos verificar de forma independiente estas sorprendentes contribuciones de los gluones y de los movimientos orbitales? De momento nadie ha propuesto una manera práctica de medir la contribución orbital. Los datos del HERMES indican que los gluones contribuyen efectivamente al espín del nucleón, pero la magnitud de esta contribución aún está por determinar. El espín de los gluones se podría determinar directamente mediante experimentos que hicieran chocar protones polarizados entre sí. Estos experimentos comenzarán el próximo año en el Colisionador de Iones Pesados Relativistas del Laboratorio Nacional de Brookhaven [*véase* "Una gran explosión originaria en pequeño", por Madhusree Mukerjee; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1999]. Un experimento de última generación del CERN —COMPASS— también medirá la contribución de los gluones. Si el valor medido resultara demasiado pequeño, nos enfrentaríamos a una "crisis de espín" mucho más importante que la anterior.

Dilucidar la estructura interna de los nucleones también tendrá importancia en otros dominios de la física de partículas. Las contribuciones al espín están íntimamente relacionadas con estructuras matemáticas que no sólo aparecen en la cromodinámica cuántica, sino que también se presentan, por ejemplo, en las interacciones débiles (que causan que algunos núcleos se desintegren y contribuyen a la generación de calor en el Sol). La regla de la suma de Bjorken, derivada en 1966 por el científico del SLAC James Bjorken, relaciona específicamente la dispersión de electrones y de neutrones polarizados (un proceso electromagnético) con la desintegración de un neutrón (un proceso de interacción débil).

Los experimentos sobre el espín de los nucleones están verificando la regla de la suma de Bjorken con creciente precisión y, por lo tanto, están verificando elementos de la estructura matemática fundamental del modelo estándar y de la cromodinámica cuántica. Los investigadores aumentan así nuestro conocimiento de las propiedades fundamentales de nuestro universo incluso cuando trabajan por responder de forma completa a una pregunta en apariencia simple, pero que es excepcionalmente difícil: ¿qué es lo que produce el espín de un nucleón?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COLISIONES ENTRE PROTONES CON ESPÍN. Alan D. Krisch en *Investigación y Ciencia*, n.º 133, páginas 18-27; octubre 1987.

THE PARTICLE EXPLOSION. F. E. Close, M. Marten y C. Sutton. Oxford University Press, 1987.

WHERE DOES THE PROTON REALLY GETS ITS SPIN? Robert L. Jaffe en *Physics Today*, vol. 48, n.º 9, págs, 24-30; septiembre 1995.

Alden M. Hayashi

STEVEN PINKER: Explorador del cerebro

Steven Pinker no se amedrenta ante las peleas. A lo largo de los años se las ha visto con las feministas, con los románticos, con los psicoanalistas y con sus colegas lingüistas, incluso con el brillante Noam Chomsky. Pero quizá su altercado más notorio fue el que sostuvo con Stephen Jay Gould, el paleobiólogo. La disputa intelectual entre ambos, en la que se vieron involucrados otros renombrados teóricos de la evolución, acabó aflorando en la primera página del *Boston Globe*.

No es extraño, por tanto, que yo albergara algún recelo cuando acudí a entrevistarme con Pinker, que tiene 44 años y es profesor de psicología y director del Centro de Neurociencia del Conocimiento en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (M.I.T.). Al entrar en su casa, una mansión victoriana deliciosamente remodelada y situada a tiro de piedra de la Universidad de Harvard, esperaba encontrarme con una sabandija maleducada. Pero enseguida me desarmaron por completo sus modales afables y su voz suave.

Pinker, que nació y se crió en Montreal, rememora uno de los momentos claves de su vida, a principios de los años setenta, cuando estaba en el liceo preuniversitario (en Quebec constituye una transición entre el instituto y la universidad). Cayó en sus manos "La revolución chomskiana", un artículo de la *New York Times Magazine* que describía las teorías de Chomsky y en particular su afirmación de que todos los lenguajes poseen una gramática universal subyacente. "Fue la primera vez —recuerda Pinker— que oía que el lenguaje fuera una facultad innata."

Los setenta marcaron también el advenimiento de otra revolución, la de la sociobiología, que es el estudio de la influencia de los genes en el comportamiento social. Abanderada por el biólogo Edward O. Wilson, la sociobiología pretendía vincular la biología con las ciencias sociales y las humanidades. Es curioso que Pinker diese la espalda a esta nueva disciplina científica, a pesar de su temprano interés por las conexiones entre biología y lenguaje. "Probablemente no me oponía a la sociobiología por ninguna razón de peso, sino porque toda la gente que conocía estaba en contra de ella", recuerda. "Especialmente tras la Segunda Guerra Mundial, pues cualquier cosa que sonara a genes caía en entredicho a causa de Hitler y de la eugenesia."



De modo que cuando comenzó la carrera en la Universidad McGill se decidió por una vía más tradicional, emprendiendo estudios de ciencias del conocimiento. "Encontraba fascinante la combinación de psicología, informática, inteligencia artificial, filosofía de la mente y lingüística", dice. Especial impresión le produjo la premisa de las ciencias del conocimiento que afirma que la información (los recuerdos, por poner un caso) se encarna en la materia y más concretamente en el tejido neuronal. También le atraían las posibilidades de verificación experimental que ofrecía esta disciplina. "Las ciencias del conocimiento —señala Pinker— ofrecen el marco y el vocabulario para comenzar a plantearse cuestiones; entonces se pueden elaborar teorías que luego hay que ir a comprobar."

Que es lo que empezó a hacer en la Universidad de Harvard, donde se doctoró en psicología, y en el M.I.T., donde permanece desde 1982. Pinker hurgó y rebuscó en las teorías de Chomsky, llevando a cabo experimentos tanto en el laboratorio como en las guarderías para determinar exactamente cómo adquieren el lenguaje los niños. Observó que los chiquillos que empiezan a balbucear cometen errores desde la más tierna infancia, por ejemplo, con el tiempo pasado de los verbos irregulares ("traí" en lugar de "traje"). Tales errores, afirma Pinker, ocurren antes de que los niños hayan procesado suficiente lenguaje como para haber inferido, partiendo de la nada, las reglas apropiadas. Con estos y otros datos, Pinker corroboró que los niños efectivamente poseen una capacidad innata para el lenguaje y desarrolló y comprobó modelos detallados del funcionamiento de tal mecanismo. Pero faltaba algo. Si las personas tienen esa facultad innata, ¿cómo se adquirió?

Firme en su terreno: Steven Pinker se enfrentó con intelectuales de renombre, como Stephen Jay Gould y Noam Chomsky, por abrazar la psicología evolutiva

En aquella época, durante un año sabático a finales de los ochenta, Pinker leyó *El gen egoísta*, de Richard Dawkins, y otras dos docenas de libros sobre biología evolutiva. "Ese era, en toda lógica, el paso siguiente", recuerda; "pasar de los mecanismos innatos tales como los de adquisición del lenguaje a saber por qué aparecieron. Y la respuesta es que mediante el proceso de evolución". Así que Pinker abrazó la psicología evolutiva, un campo que (irónicamente para él) surgió a partir de muchas de las ideas de la sociobiología.

Si el ojo humano es una adaptación —o sea, algo funcionalmente efectivo que ha evolucionado por selección natural—, entonces también lo es la mente humana, afirman los psicólogos evolutivos. De modo que las diversas facultades mentales, incluyendo la que nos capacita para el lenguaje, y la totalidad del comportamiento humano se comprenderían mejor si se consideraran en este contexto, de la misma manera que un técnico puede averiguar cómo funciona un reproductor de vídeo sabiendo primero qué es lo que hace. ¿Por qué, por ejemplo, se enamoran las personas? Más que un mero producto social, sostienen los psicólogos evolutivos, el amor romántico evolucionó biológicamente como un mecanismo de seguridad para garantizar que ambos progenitores se mantuvieran unidos cuidando de su prole, asegurando de esta manera la continuidad de sus genes.

Pinker me cuenta todo esto sentado a la mesa del comedor, que ofrece una vista sobre toda la sala de estar, exquisitamente amueblada, donde cada enser y pieza decorativa parecen tener su justo lugar. De pronto comprendo cómo considera él la mente: no como un embrollo misterioso de irracionalidades inexplicables sino como un sistema donde imperan el orden y la funcionalidad.

En 1994, en su primer libro de divulgación, *The Language Instinct*, Pinker aplicó ese minucioso darwinismo para extender las teorías de Chomsky al territorio adaptacionista. Tres años después fue mucho más lejos con *How the Mind Works*, basándose en los trabajos antropológicos de John Tobby y en los psicológicos de Leda Cosmides, junto a muchos otros. El tomo, todo un alarde de 660 páginas elegantemente escritas, pretende fundir los progresos de la ciencia del conocimiento y de la psicología evolutiva, sintetizándolas en una teoría coherente y aglutinante. El libro ni más ni menos que explicaba en términos evolutivos todo un asombroso conjunto de fenómenos (por qué nos da asco el mero hecho de pensar en comer gusanos, por qué somos proclives a engañarnos a nosotros mismos, por qué los hombres compran pornografía y las mujeres no).

Dejando de lado la persuasiva prosa de Pinker, es fácil darse cuenta de la razón por la que la psicología evolutiva despierta las iras de mucha gente. Llevada a su último extremo, pinta un panorama desolador de individuos controlados por sus genes. (Incidentalmente, las oscuras implicaciones del determinismo biológico constituyeron el azote de Wilson y de la sociobiología en los años setenta.) La especificación de las diferencias biológicas entre los géneros tiene además una extraña tendencia a degenerar rápidamente en argumentos del tipo de "que las mujeres vuelvan a la cocina". Y los libros populares en la línea de *Los hombres son de Marte, las mujeres de Venus*, con sus tenues vínculos con la psicología evolutiva, no resultan de gran ayuda.

Pinker apunta rápidamente que "las cosas tal como son" no deberían confundirse nunca con "las cosas como deberían ser". De hecho, en *How the Mind Works* se repliega sobre sí mismo para distinguir entre ciencia y moralidad. A pesar de todo, "si se lee con aversión —señala— me imagino que se puede sacar [del libro] lo que uno quiera".

La batalla entre Pinker y Gould se podría describir de la misma manera: cada uno acusa al otro de enjuiciar erróneamente sus puntos de vista. Para decirlo en pocas palabras, Gould acusa a Pinker y a otros "fundamentalistas darwinianos" de haber exagerado sin medida el cometido de la selección natural a expensas de cualquier otra consideración, desde la deriva genética estocástica hasta las irregularidades de los meteoros. Pinker reconoce la importancia de esos factores, pero replica que un sistema funcional complejo como la mente humana tiene que surgir necesaria y esencialmente de la selección natural.

Lo que saca de quicio a muchos de sus críticos es que tanto Pinker como algunos otros autores hayan llevado sus teorías mucho más allá de lo que los datos científicos pueden corroborar. Según Lyle Jenkins, biolingüista de la Universidad de Cambridge (Massachusetts), los investigadores no han logrado entender todavía todos los mecanismos individuales de desarrollo (genéticos, bioquímicos, etc.) que pudieran tener que ver con la evolución biológica de la facultad del habla. "A menos que se comprenda el problema en su totalidad —por ejemplo, el sustrato físico sobre el que obra la selección natural— carece de sentido discutir si el lenguaje es una adaptación", dice. Por esa y otras razones, el mismo Chomsky, cuyo trabajo sentó las bases para una fundamentación biológica del lenguaje, se muestra reticente a debatir si es éste una adaptación evolutiva. "Ni siquiera sé lo que eso quiere decir", replica.

Pero hay otros, entre los que se cuenta George C. Williams, uno de los más insignes biólogos evolutivos de este siglo, que afirman que Pinker ha presentado argumentos de verdadero peso para propugnar que el lenguaje sea una adaptación. De hecho, dice Williams, "recuerdo que me enfadé conmigo mismo al leer *The Language Instinct* por no habérseme ocurrido algunas de las cosas que Pinker exponía".

Semanas después de entrevistarme con Pinker, mientras intentaba aclarar este debate, me inquietaban otras cuestiones. Siendo así que la psicología evolutiva se presenta como un esquema convincente para explicar el comportamiento normal, ¿cómo es que no ha desembocado en ningún tratamiento para enfermedades mentales como la esquizofrenia y el trastorno maníaco-depresivo? Pinker me explica que si se demostrase que esas enfermedades son fisiológicas (quizá causadas por patógenos) puede que resulten intratables mediante la intervención psicológica, sea evolutiva o de otro cariz. Para otros trastornos menores, tales como la depresión o las fobias, indica que los psicólogos clínicos y los psicoterapeutas están comenzando a investigar métodos basados en la evolución.

Incluso admite que en psicología evolutiva no hay casi nada hecho, ni siquiera en la investigación de los fenómenos cotidianos. ¿Por qué, por ejemplo, la gente experimenta placer escuchando música? "Muchas veces aparecen esos hechos desconcertantes que se intenta ocultar, con la excusa de que seguro que se encontraría una respuesta con sólo que se dispusiera de tiempo para buscarla", dice. "Pero hay que darse cuenta de que a veces esos hechos son los que encierran la clave de un misterio, de modo que hay que tomárselos en serio porque pueden trastocarlo todo."

El origen africano de la humanidad, ¿una teoría anticuada?

Esta popular teoría se enfrenta a nuevas incertidumbres

Los antropólogos llevan tiempo discutiendo los orígenes de la humanidad moderna; a mediados de los ochenta surgieron dos teorías rivales. Una de ellas defiende la evolución multirregional; los seres humanos, que habrían surgido en Africa hace unos dos millones de años, evolucionarían como una especie única que se expandió por el Viejo Mundo, estando relacionados entre sí por el cruzamiento biológico y el intercambio cultural. La hipótesis africana, por el contrario, propone un origen africano mucho más reciente del hombre moderno. Se trataría de una nueva especie, distinta de los neandertales y de otros seres humanos arcaicos, a quienes terminaron por reemplazar. La teoría africana recibió un fuerte espaldarazo en 1987, cuando los biólogos moleculares declararon que podía seguirse la pista de un fragmento del legado genético de todos los seres humanos vivos hasta una mujer apodada "Eva", que vivió en Africa hace 200.000 años. Aunque más tarde se demostró que ese primer estudio sobre Eva contenía defectos graves, la teoría africana ha seguido disfrutando de gran respaldo molecular, pues los investigadores han recurrido cada vez más al ADN para descifrar la historia de nuestra especie.

Pero un análisis más detallado de esos estudios genéticos ha llevado a algunos investigadores a cuestionarse si los datos moleculares refuerzan realmente el modelo africano. Y sorprendentes datos fósiles recién descubiertos en Portugal y en Australia parecen encajar de una manera mucho más clara en la teoría de la evolución multirregional.

El ADN de las mitocondrias, los orgánulos celulares productores de energía, ha sido la clave del apoyo al modelo africano. Las mitocondrias se heredan por vía materna, de modo que la variación genética se produce en su mayor parte sólo por mutación. Y, dado que siempre se ha pensado que las mutaciones se producen de manera aleatoria y se acumulan a un ritmo constante, en teoría podría calcularse la edad del antepasado del ADN mitocondrial común (ADNmt). Este "reloj molecular" indica que el antepasado del ADNmt vivió hace 200.000 años y permite seguir la pista de la raíz del árbol genético hasta Africa. Estos resultados, junto con la observación de que la mayor variación se da en Africa (lo que indica que los seres humanos modernos habrían vivido mucho más tiempo allí), parecían ofrecer un apoyo inequívoco a un origen africano reciente de la humanidad actual.

Pero se ha cuestionado la importancia de todos estos datos. Se sospecha de la edad calculada, porque el reloj molecular se basa en suposiciones dudosas, como la fecha de calibración y la velocidad de mutación. Y si la selección natural ha conformado el ADNmt, como sugieren algunos estudios, la velocidad de acumulación de mutaciones pudiera haber sido distinta en momentos diferentes. La raíz africana del árbol génico del ADNmt es compatible con la teoría africana, pero no excluye la del multirregionalismo, según la cual el antepasado común viviría en algún lugar del Viejo Mundo, probablemente en Africa. Y tampoco la gran variación que el ADNmt de las poblaciones africanas muestra en comparación con el de las no africanas apoya exclusivamente la teoría africana, según el antropólogo John H. Relethford, pues se obtendría el mismo resultado por el simple hecho de que en Africa hubiera vivido más gente, lo que tiene sentido desde el punto de vista ecológico.

Otro problema que emponzoña los análisis genéticos, según Alan R. Templeton, reside en la tendencia de los investigadores a sacar conclusiones basadas únicamente en el sistema genético concreto que estudian. Son muy pocos quienes intentan analizar todos los sistemas y deducir un esquema. Algunos genes nucleares indican que las poblaciones asiáticas arcaicas contribuyeron al conjunto genético humano moderno y el propio análisis que Templeton hace de los sistemas genéticos múltiples revela el intercambio genético que el multirregionalismo predice entre las poblaciones.

1. El australiano más antiguo, enterrado hace 60.000 años, muestra delicados rasgos modernos, que hacen pensar en un antepasado asiático y no africano



No todo el mundo se declara convencido por los argumentos de Relethford y Templeton. Henry C. Harpending encuentra difícil de aceptar el multirregionalismo, pues diversos estudios colocan el tamaño eficaz de la población prehistórica (es decir, el número de adultos reproductores) en torno a unos 10.000. En su opinión no hay forma de que una especie compuesta por no más de 10.000 miembros se extienda desde Pekín hasta Ciudad de El Cabo. (Hay investigadores que piensan que esta cifra, basada en la diversidad genética, es mucho menor que el tamaño real de la población, quizás en varios órdenes de magnitud.) Y muchos genetistas, como Kenneth K. Kidd, insisten en que la gran mayoría de los datos es incompatible con una continuidad antigua.

Quienes sostienen el derrumbamiento de la fortaleza genética sobre la que se basa la teoría africana encuentran confirmación en datos fósiles recientes que le plantean nuevas dificultades. El pasado mes de diciembre se desenterró en el Valle de Lapedo, al oeste de Portugal, un fósil que conserva con exquisito detalle el esqueleto de un niño de cuatro años enterrado hace unos 24.000 años. Según el paleontólogo Erik Trinkaus, que lo examinó, todo el mundo esperaba que los restos pertenecieran a un ser humano moderno, teniendo en cuenta su fecha y el estilo de enterramiento. Pero el análisis posterior, que se ha publicado recientemente en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, reveló una sorprendente combinación de rasgos, como una barbilla de aspecto moderno y proporciones neandertales de los miembros. Tras revisar la literatura científica sobre los primates híbridos, Trinkaus llegó a la conclusión de que este niño se había producido por cruce entre neandertales y modernos.

No todo el mundo está convencido. Christopher B. Stringer, gran defensor del modelo africano, se pregunta si el fósil no representaría simplemente a un ser humano moderno adaptado al frío, porque en aquella época Portugal era más frío que en la actualidad. En cualquier caso sostiene que su modelo no excluye cruces ocasionales.

Para Trinkaus, sin embargo, dado que el fósil está datado millares de años después de que esos grupos entraran en contacto, lo que se ve es una mezcla de poblaciones. Los fósiles adultos encontrados en Europa central y del este muestran también los efectos de la mezcla, según el paleoantropólogo David W. Frayer. Y si los grupos se cruzaron en Europa, sostiene el multirregionalista Milford H. Wolpoff, se pueden presentar argumentos convincentes a favor de que los europeos [contemporáneos] son el resultado de la mezcla de esos grupos diferentes. O dicho de otra forma, de la evolución multirregional.

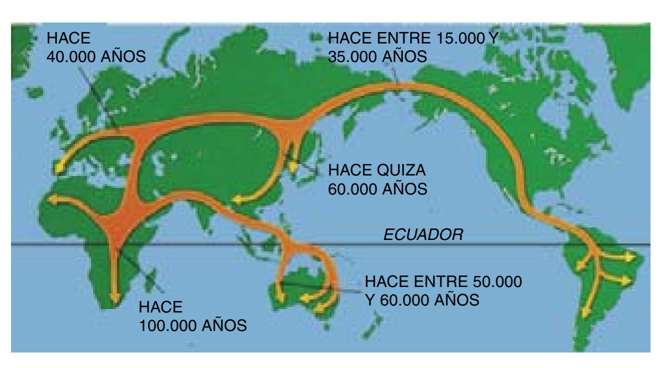
El multirregionalismo explica también mejor los sorprendentes nuevos datos procedentes de un fósil, ya conocido antes, del oeste de Nueva Gales del Sur, según el paleoantropólogo Alan Thorne. En el *Journal of Human Evolution* de junio publica que, según parece ahora, el fósil conocido como Lake Mungo 3, tiene unos 60.000 años (casi el doble de lo que se pensaba antes) y, a diferencia de los demás primeros restos australianos (todos ellos con edades de 20.000 años), éste tiene rasgos modernos y delicados. Para Stringer, esta forma grácil es indicio de la llegada de los humanos modernos, aunque primitivos, desde Africa. Con el tiempo la selección podría haber llevado a la robusta morfología observada 40.000 años después.

Pero Thorne sostiene que es improbable un cambio tan notable en un período tan corto y que los fósiles de la única región ambientalmente comparable (Africa del Sur) demuestran que los seres humanos permanecieron gráciles durante los últimos 100.000 años. Cree además que no hay nada en los datos australianos que recuerde a Africa (ni siquiera los rasgos modernos del fósil Mungo, que, en su opinión, se parecen mucho más a los de los fósiles chinos contemporáneos). Y observa que los australianos indígenas vivos comparten un conjunto especial de rasgos esqueléticos y dentales con los seres humanos que habitaron Indonesia hace al menos 100.000 años.

Una explicación más simple sería, según él, que ambos grupos hubieran llegado a Australia en momentos diferentes (uno procedente de China y el otro de Indonesia) y se hubieran mezclado, de manera muy parecida a como se ha propuesto para los neandertales y los europeos modernos. Este mismo patrón se ha dado en la historia reciente, en el cruce que tuvo lugar cuando los europeos que llegaron a Norteamérica y a Australia se encontraron con los indígenas, comportamiento que es el habitual de los seres humanos.

El misterio del origen de la humanidad está lejos de su resolución, pero, dado que el ADN parece no ser tan diagnóstico como parecía, Thorne propone que se vuelva a los huesos, en lo que coincide la genetista Rosalind M. Harding, para quien es muy ventajoso que los descubrimientos fósiles obliguen a plantearse otras posibilidades.

KATE WONG

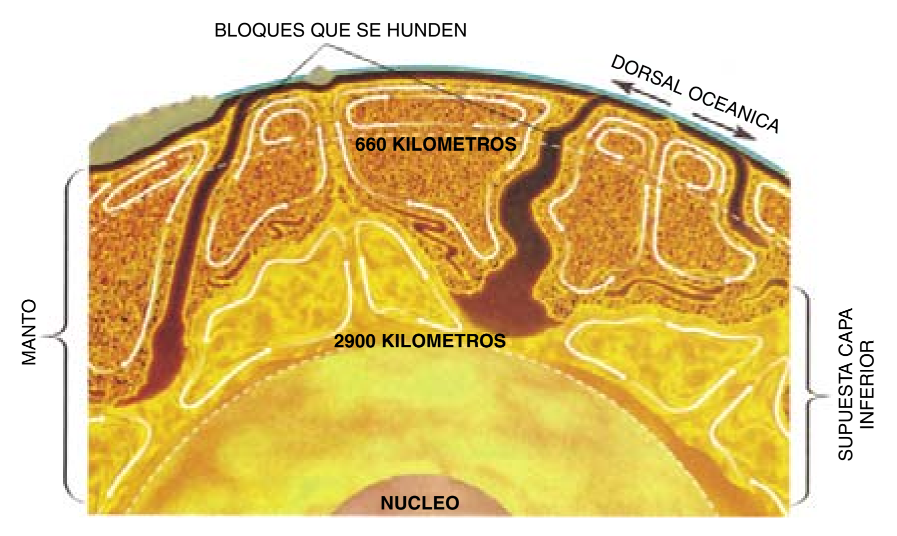


2. La teoría africana propone que los seres humanos modernos surgieron en Africa y reemplazaron a las restantes especies humanas por todo el orbe

Chapoteos

Una capa ondulante de rocas ardientes templa las discusiones sobre los movimientos del manto terrestre

Como dice el refrán, lo que importa es lo de dentro; la Tierra no es una excepción. La roca sólida de su manto tiene la temperatura suficiente para conservar una cierta plasticidad, por lo que su forma externa puede condicionarse desde dentro según como se muevan las placas tectónicas superficiales. Cuando chocan entre sí, las placas se arrugan y forman cordilleras o se hunden en el substrato de roca viscosa, de donde volverán a ascender millones de años más tarde en forma de lava



El viscoso manto terrestre pudiera fluir en dos capas (flechas). *Los bloques tectónicos se hunden en el seno de la superior, pero no atravesarían una supuesta capa más densa situada debajo*

que borbotea a través de las crestas oceánicas.

Sin este programa de reciclado rocoso, la Tierra sería tan estéril y estaría tan acribillada de hoyos como la Luna. Pero uno de los grandes misterios de nuestro planeta sigue siendo el de cómo se mueve exactamente el manto con sus casi 3000 kilómetros de espesor. Después de tres decenios de acalorado debate empieza a emerger una hipótesis que pudiera calmar las aguas.

Desde los años cincuenta los geoquímicos han venido suponiendo que el manto actúa como una doble caldera: una capa en la que no abundan los elementos radiactivos se agita en la parte superior, pero no se mezcla nunca con la capa radiactiva de abajo. Los primeros sondeos sísmicos del manto revelaron un brusco aumento de la densidad a una profundidad de 670 kilómetros, que sería justamente la frontera que evitaría que las capas se mezclasen. La existencia de una capa de elementos radiactivos podría explicar además por qué el planeta produce más calor de lo que sería de esperar.

Pero conforme se dispuso de mejores datos sísmicos para centrar el cuadro, se comenzó a concebir el manto como un cazo gigante de sopa hirviendo. Se observaron indicios de que había bloques tectónicos que se hundían profundamente traspasando aquel límite. Louise H. Kellogg estudia modelos del manto terrestre y piensa que cuando algo está en continua agitación es difícil que haya capas duraderas. Los bloques perforan la barrera de los 670 kilómetros porque los minerales que hay por debajo no son más que formas más compactas de los de arriba, oponiendo menor resistencia que si fueran de una clase diferente.

Durante largo tiempo no se tuvieron en cuenta otras posibilidades. Pero no hace mucho que los investigadores han comenzado a encontrar indicios que podrían reconciliar la concepción sismológica de los bloques que se hunden profundamente con la necesidad geoquímica de que haya una capa aislada y productora de calor.

Hace aproximadamente un par de años que Rob D. van der Hilst observó que las regularidades sísmicas tienden a perderse a profundidades mayores de unos 1700 kilómetros. Si el flujo del manto fuera global y uniforme, se observarían las mismas pautas en toda su extensión. Esta fractura sísmica podría explicarse mediante una hipótesis propuesta por el geofísico Richard O'Conell, la de que en el manto inferior hubiera burbujas boyantes de roca radiactiva.

Pero van der Hilst sospechaba que a medida que esas burbujas se calentasen, se filtrarían en la roca circundante y desaparecerían. Consideraba más fácil que se conservase una capa aislada situada en el tercio inferior del manto. Empleando simulaciones informáticas, van der Hilst, Kellogg y Bradford H. Hager descubrieron que una capa que no fuera más que un 4 por ciento más densa que el manto situado encima podría permanecer intacta durante miles de millones de años. Más caliente que la superior, esta capa contendría regiones que se dilatarían hacia arriba, pero sin llegar a convertirse nunca en burbujas separadas como las de O'Conell.

Una de las ventajas de este modelo es que permite la presencia de depósitos de diferente composición, así como la mayor penetración de los bloques en unos lugares que en otros. La supuesta capa inferior se estrecha bajo los bloques fríos que se hunden, llegando algunas veces a alcanzar la frontera entre el manto y el núcleo.

Pero el sismólogo Don L. Anderson no está convencido de que los bloques alcanzaran tales profundidades si estos investigadores hubieran considerado la presión además de la temperatura y la densidad, pues sostiene que a grandes presiones hace falta una enorme variación de temperatura para hacer que las cosas se hundan o floten. Aunque él lleve mucho tiempo abogando por la existencia de una capa definida en el manto profundo, no se sorprende ante el descubrimiento, pues ha tratado siempre de convencer a los modeladores de que tenían que emplear capas fluidas.

Alguien más apoya la nueva idea de una capa en el manto. El geoquímico Albrecht W. Hofmann opina que una capa profunda puede ser por lo menos tan buen depósito radiactivo como otra que empiece a los 670 kilómetros de profundidad. Los cálculos del grupo de O'Conell demuestran que cuando sus burbujas alcanzan una cierta densidad, se hunden en una capa como la de Kellogg. Puede incluso que en diversas épocas de la historia de la Tierra hayan existido unas y otras, burbujas y capas.

SARA SIMPSON

Magia perforada

Un fenómeno óptico "fantasmal" pudiera hacer que las pantallas de los ordenadores portátiles fuesen más brillantes y los circuitos lógicos más rápidos

A cualquiera le parecería mágico. Incluso a Thomas Ebbesen se le pusieron los pelos de punta cuando, hace diez años, puso a la altura de sus ojos un cubreobjetos recubierto de oro y vio no solamente su re-

flejo en él, sino también el otro lado de la habitación a través de él. Esta no era la manera en que se suponía que debían comportarse el oro y la luz.

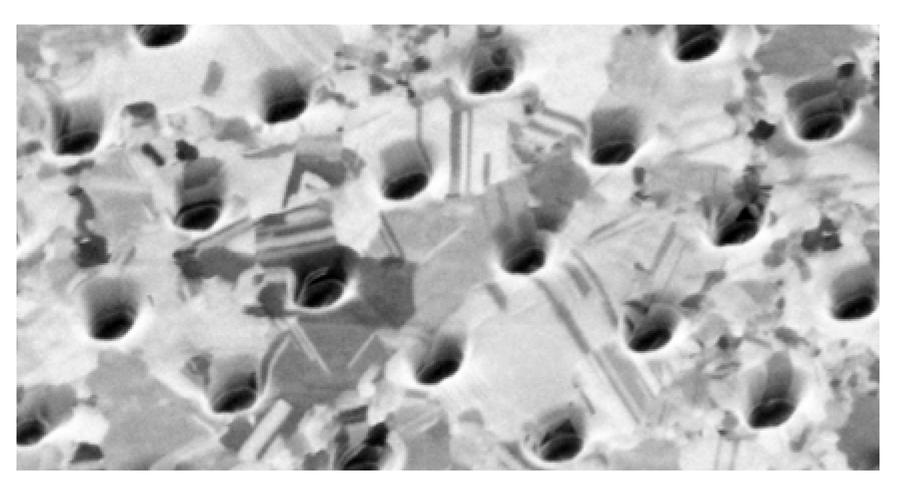
Ebbesen, que trabajaba entonces en NEC Research en Japón y está ahora en los laboratorios de la compañía en Princeton, Nueva Jersey, esperaba que algo de luz atravesase la lámina de oro, pues había usado un haz de iones para rociar la capa metálica con 100 millones de agujeros microscópicos. Pero estos agujeros eran tan minúsculos —de sólo unos cientos de nanómetros de diámetro cada uno, menos de la mitad de la longitud de onda de la luz visible— que la física elemental predecía que cualquier visión realizada a través de ellos sería confusa e indistinta, como a través de un vidrio translúcido.

Pero la realidad fue que no sólo pudo ver la luz, sino también colores y contornos, como a través de unas gafas de sol. En aquella época no tenía idea de las posibilidades que la aplicación del fenómeno ofrecía, pero sí sabía que comprenderlo no era fácil.

El misterio no hizo más que profundizarse conforme se le investigaba. Ulteriores experimentos confirmaron que hasta el cincuenta por ciento de la luz incidente sobre ciertas láminas perforadas pasaba a través de ellas, aunque los agujeros no representaran más que el veinte por ciento de su área. Esto se parecía bastante a una ventana que dejase pasar tanta luz como una puerta abierta de doble tamaño. El efecto mostraba caprichosas preferencias respecto de algunos colores: a determinadas longitudes de onda la luz se transmitía con una intensidad mil veces mayor que lo predicho por la ciencia conocida, mientras que otros colores no se intensificaban en absoluto.

A medida que se probaban miríadas de permutaciones de materiales y de disposiciones de agujeros, continuaron las sorpresas al descubrirse que el fenómeno se producía con cualquier metal y no sólo con el oro. También aparecía con montones de soportes transparentes y no sólo con el vidrio. Funcionaba tan bien con siete agujeros como con un millón.

Ebbesen luchó con el problema durante casi un decenio y, manteniendo la boca cerrada como suelen hacer los investigadores de las empresas, esperó hasta que pudiera explicar, dominar (y patentar) el fenómeno para hacer públicos sus descubrimientos. Su confusión duró hasta no hace muchos años.



Colador óptico hecho por un haz de átomos cargados que perforó orificios de 150 nanómetros de diámetro en una película de plata. A través de los agujeros pasa hasta mil veces más luz de la que los físicos habían creído posible

En una reunión de la Sociedad Americana de Física realizada el pasado mes de marzo en Atlanta se hizo público que ahora se dispone de una teoría y se han ideado maneras de controlar el color y la intensidad de la luz que pasa a través de tales láminas perforadas. Ebbesen atribuye el mérito del decisivo progreso teórico a Peter A. Wolff, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, quien lanzó la idea de que quienes guían de alguna manera la luz hacia los agujeros son unos paquetes errantes de electrones, llamados plasmones.

Piénsese en un mar de electrones flotando sobre la superficie de un metal; los plasmones serían entonces como las olas que chapoteasen en él. La realización de los agujeros es como si se hundieran estacas en el agua: la forma de las olas cambia. Los plasmones errantes generan campos eléctricos y magnéticos turbulentos que hacen que la superficie perforada del oro se parezca más a una criba que al espejo deslustrado que sería normalmente. Es como un colador de fotones: incluso la luz que cae fuera de los agujeros resulta reconducida a través de ellos.

Puede que los coladores ópticos terminen encontrando muchas aplicaciones. NEC se centra en dos que son potencialmente lucrativas. La primera consiste en máscaras de microcircuitería más resistentes y más luminosas, que se podrían aplicar directamente sobre las obleas de silicio para grabar en ellas configuraciones mucho más detalladas de lo que las actuales máquinas fotolitográficas permiten. Tal avance permitiría alargar la vida de las fábricas de microcircuitos existentes, ahorrando a sus dueños muchos miles de millones de dólares.

La segunda aplicación sería en pantallas planas y aprovecharía la capacidad que tienen los coladores ópticos para cambiar las especificaciones de los colores que dejan pasar y los que detienen. El grupo de NEC ha hallado dos maneras de hacerlo. Una consiste en alterar el espacio entre los agujeros; la otra, en ajustar el ángulo de incidencia de la luz, tal vez empleando una capa de cristal líquido junto a la capa metálica.

Con ambas técnicas se han logrado éxitos. Uno de los prototipos realizados puede hacer que luz procedente de la mezcla de dos haces láser transmitidos a través del colador aparezca sucesivamente como roja, amarilla o verde sin emplear filtros ni polarizadores, como requieren las actuales pantallas de cristal líquido. Los coladores ópticos podrían acoplarse en principio a diodos emisores de luz o a los fósforos de los tubos catódicos, con lo que se conseguirían pantallas planas que brillarían seis veces más que las actuales y que gastarían mucha menos batería.

Los ingenieros tendrán que descubrir maneras prácticas y baratas de fabricar grandes láminas nanoperforadas si es que quieren competir con los cristales líquidos. Douglas H. Adamson, de la Universidad de Princeton, presentó en la misma reunión un método nuevo que pudiera

ser aprovechable. Han descubierto un par de polímeros que, mezclados y aplicados como recubrimiento de una oblea de silicio, reaccionan químicamente de manera que uno de los polímeros se autoorganiza como un damero de esferas, cada una de las cuales tiene unos cuantos nanómetros de diámetro. Si se disuelven las esferas y se graba después a través del polímero restante, pueden crearse rápidamente piezas relativamente grandes de metal agujereado y hacerlo de forma mucho más económica que perforando los agujeros de uno en uno, como hace Ebbesen. Puede que sea justamente el truco necesario para que los coladores ópticos resulten prácticos.

W. WAYT GIBBS

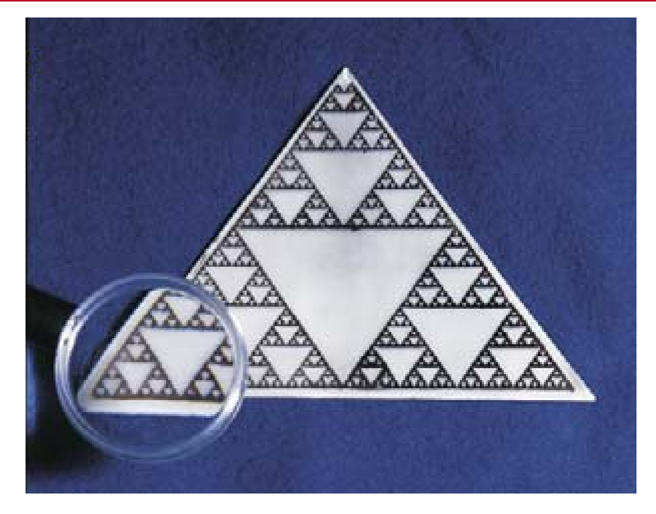
Comunicaciones inalámbricas

Fractales útiles

Los objetos fractales se han convertido en uno de los principios unificadores de la ciencia, pero las aplicaciones técnicas de estas formas geométricas no se han apresurado, salvo en el grafismo informático. Los investigadores empezaron a aplicarlos hace diez años a un problema particularmente espinoso: el diseño de antenas.

Las antenas son objetos sencillos en apariencia, pero la teoría subyacente, basada en las ecuaciones de Maxwell para el electromagnetismo, es casi impenetrable, razón por la que los proyectistas de antenas se ven obligados a proceder por tanteos, en su mayoría erróneos. Incluso los receptores técnicamente más avanzados dependen con frecuencia de un hilo colgante que no se diferencia en nada de los utilizados hace un siglo por Giuglielmo Marconi en sus primeras pruebas de transmisión por radio.

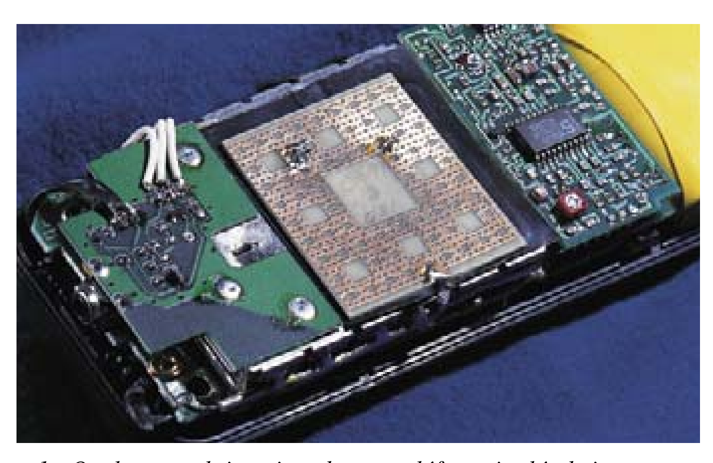
Los fractales mejoran la situación por dos conceptos. En primer lugar, pueden aumentar el rendimiento de las antenas compuestas. Muchas antenas que en apariencia parecen constituir una sola unidad —gran parte de las antenas de radar, entre ellas— están en realidad compuestas por una formación de hasta un millar de pequeñas antenas. Su disposición suele ser o perfectamente regular o, por el contrario, aleatoria. Dwight Jaggard y Douglas Werner han descubierto que una distribución fractal puede combinar la robustez de los sistemas aleatoriamente dispuestos con el rendimiento de los regulares, todo ello utilizando la cuarta parte de elementos. Las fractales tienden así un puente, pues ofrecen desorden a pequeña escala y orden en la grande.



2. Un triángulo fractal puede actuar como antena miniaturizada

En segundo término, la forma fractal puede ser beneficiosa incluso para antenas aisladas. Nathan Cohen ha experimentado con hilos doblados siguiendo la forma de las curvas de Koch, o de los triángulos de Sierpinski (*arriba*). Al replegar así la antena se consigue no sólo alojar la misma longitud en un espacio seis veces menor, sino que su forma dentada genere capacitancia e inductancia adicionales, haciendo innecesarios elementos externos para su sintonización o para aumentar la anchura de la banda de frecuencias que pueda recibir.

Cohen, que fundó Fractal Antenna Systems hace cuatro años, trabaja en la actualidad con T&M Antennas, fabricante de antenas para los teléfonos móviles de Motorola. Uno de los ingenieros de T&M, afirma que el rendimiento de las antenas fractales es un 25 por ciento mayor que el de las habituales antenas romas, revestidas de goma, con que van equipados muchos teléfonos móviles o inalámbricos. Amén de ser más baratas de fabricar, operan en múltiples bandas, lo que permite incorporar un receptor GPS (sistema de posicionamiento global) al teléfono, al tiempo que la antena puede quedar oculta en el interior del aparato (*izquierda*).



1. Oculta en el interior de un teléfono inalámbrico, una antena fractal cuadrada (centro) *reemplaza a la típica antena telescópica*

La razón de que estas antenas fractales funcionen tan bien quedó parcialmente explicada en el número de marzo de la revista *Fractals*. Cohen y su colega Robert Hohfeld demostraron matemáticamente que para que una antena ofrezca un comportamiento uniforme a todas las frecuencias ha de satisfacer dos criterios. Primero, ha de presentar simetría respecto a un punto. Y segundo, ha de ser sibisemejante, ofrecer básicamente el mismo aspecto a todas las escalas. Es decir, ser fractal.

GEORGE MUSER

Biología de la evolución

Comer tierra para vivir sano

Las madres suelen advertir a sus hijos que no coman tierra. Luego hay algunos adultos que lo hacen, dignificando tal comportamiento con el nombre de geofagia. El consumo regular e intencionado de tierra, sola o mezclada con alimentos, aparece en las sociedades humanas tradicionales de todos los continentes, en especial entre las mujeres embarazadas. La geofagia se ha documentado asimismo en muchas especies de mamíferos, aves, reptiles, mariposas e isópodos, especialmente entre los herbívoros. ¿Por qué lo hacen y por qué lo hacemos? James Gilardi y sus colaboradores han investigado las funciones biológicas propuestas y han descubierto una fascinante carrera armamentista evolutiva entre las plantas y sus posibles consumidores animales.

Los animales estudiados fueron loros de la pluviselva amazónica peruana, de los que más de un millar de individuos de veintitantas especies se reúnen todos los días a primera hora de la mañana en determinados lugares de las orillas de los ríos y de las paredes de los acantilados en los que el suelo está desnudo. Son sitios ideales para la observación y la fotografía, de modo que atraen anualmente a varios miles de turistas, generan medio millar de puestos de trabajo locales y aportan a Perú unos mil dólares por guacamayo silvestre. La afición que las aves tienen por la tierra es muy concreta. No sólo se congregan en un recodo determinado del río Manú, por ejemplo, sino que lo hacen precisamente en una banda de suelo que tiene varios cientos de metros de largo, desdeñando las zonas situadas a sus lados.

Los investigadores comprobaron las posibles funciones de la geofagia comparando las propiedades físicas y químicas de muestras de suelo procedentes de las bandas preferidas y de las adyacentes.

La explicación más común de la geofagia de las aves es que sirve para la obtención de arena y de grava. Como carecen de dientes, muchas aves ingieren guijarros o arena gruesa para triturar la comida en sus mollejas. Los tamaños preferidos aumentan con el tamaño del ave, yendo desde los 0,5 mm de los gorriones hasta los 2,5 cm de los avestruces. Gilardi comprobó que la tierra preferida por los loros peruanos es muy fina. La proporción de partículas que superen los 0,05 mm de diámetro no es más que del cinco por ciento. La mayoría es arcilla, con partículas de menos de 0,2 μm. Los suelos preferidos no contienen más que la cuarta parte de arena gruesa, pero casi el doble de arcilla fina, que los rechazados. De modo que los loros no comen para obtener arena. Si se piensa en ello, no resulta sorprendente: no la necesitan, pues su pico fuerte y aguzado les permite cascar las nueces más duras.

Otra función de la geofagia, propuesta para los casos del ganado doméstico y los de los ungulados salvajes, los conejos, las mariposas y las mujeres embarazadas, es la obtención de minerales esenciales. Los suelos que se venden en los mercados de Ghana a las mujeres africanas embarazadas tienen más hierro y más cobre que las pastillas de suplemento dietético fabricadas por las compañías farmacéuticas para uso prenatal. Pero nuestros autores descubrieron que los suelos preferidos por los loros tienen menores cantidades de minerales biológicamente relevantes que los desdeñados y cantidades mucho menores que las plantas que consumen. De modo que, a menos que el gusto de los loros les haga equivocarse mucho en sus preferencias, no seleccionan los suelos por su contenido en minerales.

Una tercera función de la geofagia, que podría servir de explicación para el caso del ganado doméstico, es la de tamponar el contenido del rumen. Puesto que los loros carecen de rumen, no resulta sorprendente que sus suelos preferidos tengan la misma capacidad tamponadora que el agua destilada.

¿Qué es, pues, lo que buscan realmente los loros en la tierra que ingieren? Resulta que su dieta regular incluye semillas y frutos verdes cuyo contenido de alcaloides y de toxinas es tal que resultan amargos y hasta mortales para los seres humanos y para otros animales. Algunas de estas sustancias tienen carga positiva en las condiciones ácidas predominantes en el estómago, por lo que se unen a los minerales de la arcilla que poseen lugares de intercambio de cationes cargados negativamente. Esta es la razón de que los turistas curtidos que se dirigen a lugares donde predominan las



Loros cabeciazules (Pionus menstruus) *en un lamedero de arcilla en Manú, Perú. Se ha demostrado que los minerales de la arcilla detoxifican la dieta vegetal de las aves*

malas condiciones higiénicas lleven medicinas que absorban las toxinas, como el caopectato (concentrado de minerales de arcilla). Y también lo es de que los campesinos agricultores y cazadores-recolectores de todo el mundo soliesen mezclar ciertos alimentos vegetales amargos pero nutritivos (como son las bellotas y las patatas silvestres) con tierras escogidas antes de consumirlos.

Los loros peruanos se comportan como refinados turistas y campesinos humanos. Sus suelos preferidos poseen una capacidad de intercambio de cationes mucho mayor que las bandas adyacentes rechazadas, abundando en los minerales esmectita, caolín y mica. El suelo preferido supera a la caolinita y a la bentonita puras en capacidad de aglutinar la quinina y el ácido tánico. Son evidentes las cualificaciones de los loros como prospectores de minerales.

Esta hipótesis se confirmó con dos grupos de pruebas biológicas. En primer lugar se expuso *Artemia salina* (el animal que normalmente se utiliza para las pruebas toxicológicas) a extractos de las semillas que los guacamayos comen de manera rutinaria. Muchas de las *Artemia* murieron, confirmando así la toxicidad de la dieta de los loros. La supervivencia del crustáceo mejoró cuando se mezclaron los extractos con el suelo preferido por los guacamayos, lo que reducía las cargas efectivas de toxinas entre un 60 y un 70 %. En segundo lugar se les

Cucarachas al volante

No hace mucho que se difundió la noticia de que unos investigadores japoneses habían demostrado que podían gobernarse mediante injertos los movimientos de una cucaracha. Su intención era que dichas “robocucarachas” sirvieran para la vigilancia disimulada o para rebuscar entre los despojos. El ingeniero Jimmy (Hajime) Or ha desarrollado una faceta de esta relación: el control por cucaracha de un vehículo automático.

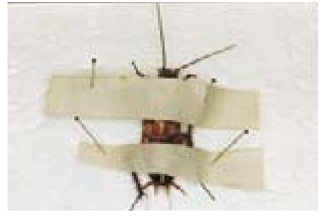
Or construyó el año pasado lo que él llama un “robot biomecatrónico” mientras cursaba estudios de posgrado en la Universidad de Tokio. Primero fijó con cinta adhesiva una cucaracha americana sobre un tablero (*abajo a la izquierda*) y le injertó en los músculos extensores de las patas traseras unos hilos de plata muy finos. Se dejó luego correr a la cucaracha sobre una especie de rótula de control (*abajo a la derecha*). Las débiles señales eléctricas que generaban los músculos eran captadas por los hilos y, una vez amplificadas, excitaban los motores de las ruedas. Se pretendía así que la máquina reprodujese la velocidad y la dirección del movimiento de la cucaracha.

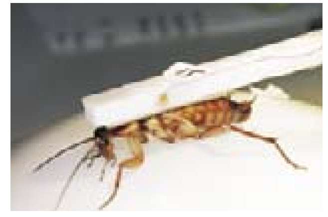
¿Para qué sirve un robot que trata de escabullirse por un agujero cuando se encienden las luces de la cocina en mitad de la noche? Lo que en realidad pretendía averiguar el robot de Or es si un sistema nervioso biológico podría servir como mecanismo de control. Para los especialistas en robótica —especialmente quienes se ocupan de las invenciones que emulan a artrópodos— el problema es la integración y la coordinación de toda la información necesaria para que las articulaciones actúen conjuntamente. La cuestión fundamental es conseguir un robot que se mueva con la rapidez y agilidad de un insecto.

Aún no puede saberse si Or ha elegido el camino acertado. El propio inventor cree que los sistemas nervioso y sensorial del insecto podrían ofrecer alternativas a los complicados ordenadores que controlan las misiones espaciales. Tiene previsto iniciar un programa de doctorado en los Estados Unidos, lo que le permitiría perfeccionar su robot controlado por cucarachas. ¿Cuál sería el paso siguiente? “Achicarlo hasta que tenga un tamaño parecido al de su conductor”, declara animoso el investigador.

PHILIP YAM







administró a loros del Amazonas una dosis oral del alcaloide quinidina con y sin tierra, midiéndose los niveles de quinidina en la sangre de los animales durante tres horas, mientras tenía lugar la absorción en el tubo digestivo. La adición de suelo redujo en un 60 % los niveles sanguíneos de quinidina.

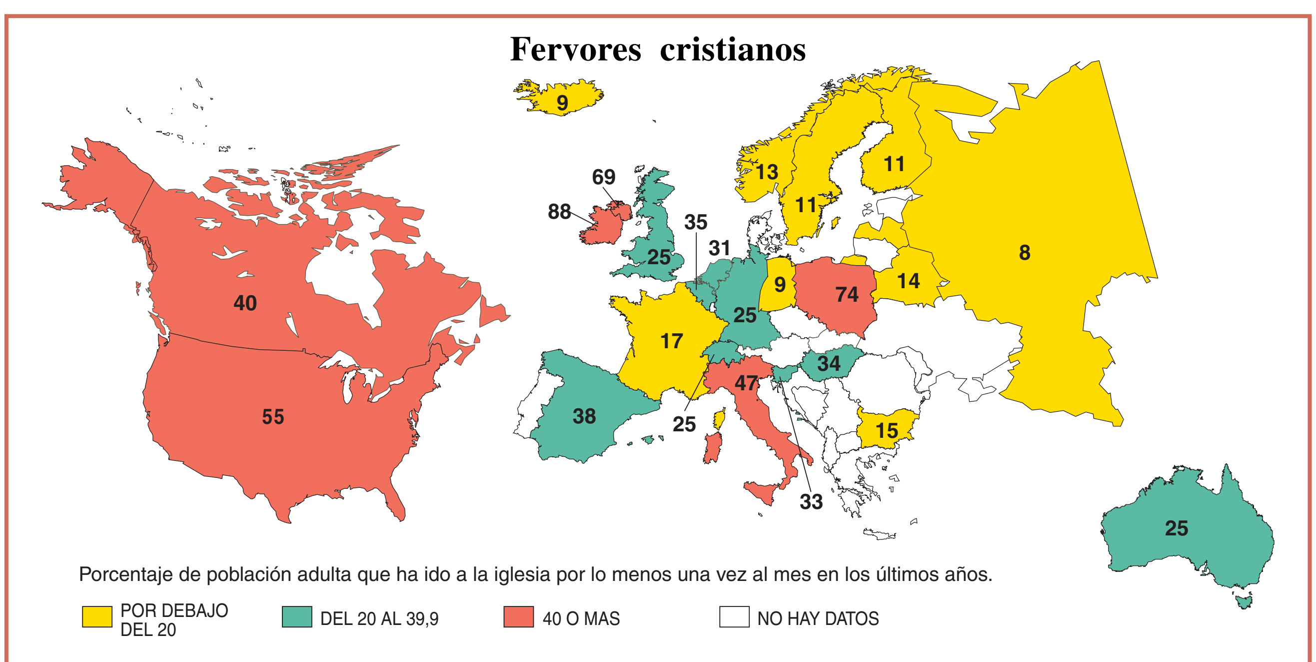
¿Cuál es el significado evolutivo de las toxinas vegetales y del comportamiento antitoxínico de los animales? Desde el punto de vista evolutivo de la planta, una semilla ha de tener una gran concentración de nutrientes que permitan la germinación y el crecimiento de los pimpollos. El fruto maduro que rodea la semilla también tiene que ser nutritivo y atractivo para los animales, animándoles así a arrancarlo y a comerlo, dispersando la semilla. Pero la propia semilla tiene que resultarles repulsiva, induciéndoles a regurgitarla o a defecarla. Lo mismo le sucede al fruto inmaduro, que los animales no deben comer antes de que la semilla sea viable. Desde la perspectiva evolutiva de un animal, la capacidad de eliminar las defensas tóxicas de la planta le permitiría obtener los nutrientes de la semilla además de los del fruto maduro y su posición en la competencia con otros animales mejoraría si pudiese recolectarlo inmaduro, mientras a ellos les resultase desagradable.

Cualquier manual de biología animal describe la carrera armamentista evolutiva que resulta de ello, en la que las plantas desarrollan por evolución toxinas cada vez más potentes (como la estricnina y la quinina) y los animales desarrollan por evolución sistemas de detoxificación cada vez más potentes. Aunque la detoxificación enzimática haya recibido hasta ahora la mayor parte de la atención, la investigación de Gilardi y la amplia distribución de la geofagia entre los animales herbívoros sugiere que la adsorción de minerales del suelo constituye otro sistema de detoxificación importante.

Surgen así toda una serie de cuestiones interesantes. ¿Cómo descubren los loros los mejores suelos? ¿Pueden discriminar inmediatamente entre ellos por la textura y el sabor o tienen que hacer pruebas hasta descubrir cuál es el que alivia los trastornos estomacales? ¿Acaso la disponibilidad de lugares de geofagia adecuados podría limitar la distribución de los herbívoros y merecer que los biólogos de la conservación se ocupasen de ello? ¿Por qué no son más que determinadas especies de herbívoros las que visitan los lugares de geofagia? Y, volviendo a nuestros sucios hábitos infantiles, ¿no habría que animar a los niños curiosos que se lamen las manos manchadas de tierra por realizar experimentos de automedicación?

JARED M. DIAMOND
Dpto. de Fisiología,
Universidad de California,
Los Angeles

Fervores cristianos



Porcentaje de población adulta que ha ido a la iglesia por lo menos una vez al mes en los últimos años.

FUENTE: Ronald Inglehart y Wayne E. Baker, "Modernization, Secularization, Globalization, and the Persistence of Tradition", en el "Millennial Symposium" de la American Sociological Review *(en prensa). Los datos son de 1995-1997, excepto para Irlanda, Irlanda del Norte, Italia, Bélgica, Canadá, Holanda, Gran Bretaña, Hungría, Francia e Islandia, donde son del período 1990-1991. Las Alemanias del Este y del Oeste figuran aquí todavía como dos estados distintos.*

El hecho de que tantos estadounidenses asistan a los servicios religiosos se debe a que en los EE.UU. hay libertad de mercado para la religión y el mercado libre promueve la competencia proselitista entre los múltiples grupos religiosos, según los sociólogos Roger Finke y Rodney Stark. Las iglesias estadounidenses, a diferencia de lo que hacen las consolidadas iglesias europeas, compiten de continuo entre sí para hacerse más atractivas a los posibles feligreses, gracias a lo cual consiguen que vaya en aumento el número de sus miembros. Finke y Stark calculan que el total de fieles ha pasado de un 17% de la población en 1776 a cerca del 60% en la actualidad. Los congregacionalistas, los episcopalistas y los presbiterianos estaban entre quienes contaban con más adeptos en 1776, pero fueron perdiendo posiciones por no estar bien preparados para competir proselitísticamente, sobre todo en las zonas de rápida expansión de la frontera. Sus bien pagados y cultos ministros se mostraban muy reacios a dejar las confortables parroquias del este para ir a prestar sus servicios espirituales en el agitado mundo del lejano oeste. El carácter erudito, y a menudo seco y tedioso, de sus sermones resultaba además poco atractivo para los colonizadores de las tierras fronterizas.

Así que las confesiones chapadas a la antigua no tardaron en ser eclipsadas por los metodistas y por los baptistas, que en sus animadas asambleas y por medio de predicadores ambulantes prometían la vida eterna a los justos y amenazaban con el fuego infernal a los pecadores. Añádase que a sus relativamente incultos ministros les era más fácil congeniar con la gente del pueblo llano, pues la mayoría de ellos procedían del mismo estrato social. Así, a mediados del siglo XIX, los metodistas llegaron a ser el grupo más numeroso; pero a medida que se fueron enriqueciendo y que sus ministros adquirieron más cultura en los seminarios, decayó su fervor, de modo que quienes anhelaban una fe más evangélica se salían de la congregación para fundar otras iglesias nuevas.

A comienzos del siglo XX los metodistas estaban en franco declive, mientras que los baptistas conservaban su fervor y seguían prosperando, sobre todo en el sur. Actualmente la Convención Baptista del Sur, con 16 millones de adeptos, es la mayor confesión protestante de los EE.UU. y, junto con otras evangélicas, contribuye a la importancia de la práctica religiosa en el país.

También han contribuido a este elevado porcentaje los católicos. Inicialmente eran pocos los inmigrantes procedentes de países tradicionalmente católicos que tuvieran por costumbre el ir a misa. Para atraérselos, los sacerdotes católicos adoptaron los métodos evangelistas, predicando un mensaje de renovación personal con peculiares técnicas revitalizadoras —las llamadas misiones parroquiales—. Igual que los predicadores ambulantes metodistas y baptistas, los sacerdotes católicos no perseguían su propio bienestar y estaban dispuestos a ir a donde la Iglesia les enviase. Procedían de la misma clase popular a la que servían y su mensaje, lanzado sin ornamentación literaria, era fácilmente comprendido. La Iglesia Católica Romana, con sus 61 millones de fieles, es hoy con mucho la mayor confesión religiosa de los EE.UU.

Los porcentajes de asistencia mensual a los oficios de iglesia en Europa van desde sólo un 8 % en Rusia hasta el 88% en Irlanda. Lo escaso de la proporción en Rusia (y en la mayoría de los demás países del bloque años atrás soviético) es muy probable que en parte se deba a la supresión oficial de la religión durante la era comunista. En Irlanda (y también en Polonia) la Iglesia Católica es tan popular porque se la considera como una defensa contra los enemigos extranjeros. Las diferencias en otros países europeos podrían explicarse tal vez con una vieja teoría según la cual los protestantes son más proclives a dejar de ir a la iglesia porque el protestantismo abandonó el muy emotivo lenguaje y la rica simbología del catolicismo, que, como se suele decir, son factores que sirven de contrapeso al frío racionalismo de la ciencia y la técnica modernas.

Algunos datos concuerdan efectivamente con la teoría que relaciona la práctica religiosa y la confesión de que se trate: los países escandinavos tienen poca población católica y muy bajos porcentajes de asistencia a la iglesia. La antes Alemania Occidental, donde tanto los protestantes como los católicos son amplias minorías, tienen una tasa de asistencia intermedia, mientras que en Italia, país de mayoría católica, la proporción de asistencia a la iglesia es bastante grande. Pero la mayor parte de los demás países europeos no encajan tanto en este cuadro: España y Bélgica, países ambos tradicionalmente católicos, tienen unas tasas de asistencia intermedias y en cambio en Francia, también tradicionalmente católica, el porcentaje de asistencia a la iglesia es mínimo, lo cual no es extraño, dada su larga tradición anticlerical.

RODGER DOYLE
(rdoyle2@aol.com)

De cerca

Texto y fotos: Josep-Maria Gili y Rafel Coma

Formas de vida

La mayor parte de los organismos del medio acuático flotan sobre el agua o viven suspendidos en ella. Todas sus actividades se desarrollan allí. En ella encuentran alimento y a ella liberan sus productos de desecho. Se denomina *seston* a todo el conjunto de materia orgánica suspendida en el agua, lo que comprende desde la materia disuelta hasta los organismos del fitoplancton y del zooplancton, pasando por partículas orgánicas de todo tipo y tamaño. La ubicuidad, la abundancia y la diversidad del seston favorecen su aprovechamiento por muchos organismos diferentes.

Los animales bentónicos sésiles están situados sobre el lecho marino y capturan lo que las corrientes arrastran hacia sus órganos especializados. Conocidos como suspensívoros bentónicos, representan uno de los métodos más difundidos de obtención de alimento en el medio marino. Los paralelismos que pueden encontrarse en la tierra o en el aire son escasos. Tan sólo algunas arañas, que capturan las presas adheridas a sus telas, o las flores carnívoras, que devoran los insectos que se acercan a sus pétalos, podrían representar mecanismos tróficos parecidos.

La vía suspensívora ha marcado procesos evolutivos muy variados entre los invertebrados marinos. Los hay capaces de bombear agua mediante sifones (moluscos bivalvos), circuitos acuíferos (esponjas) o potentes cavidades branquiales (ascidias). Otros realizan la captura limitándose a ofrecer sus estructuras coloniales a la corriente e interceptando las partículas que circulan a través de ellos (gorgonias, hidrozoos). Los hidrozoos son capaces de producir además diversos movimientos con sus penachos, tentáculos y apéndices, atrayendo hacia sí partículas de distintos tamaños.

Estas fotografías permiten observar algunos ejemplos de la gran variedad morfológica resultante, lo que se conoce como diversidad funcional en el medio marino. Cuando uno se acerca a las paredes de lugares esciáfilos sometidos a ciertas corrientes mediterráneas (*debajo*) se observa un espectacular rompecabezas de formas y de colores, constituido por la gran variedad de estructuras capturadoras desarrolladas por grupos tan diversos como esponjas, cnidarios, moluscos, poliquetos y ascidias.

1. Comunidad bentónica dominada por suspensívoros localizada en las paredes rocosas de las islas Medas (Gerona)





2. Detalle de un madreporario cuyos tentáculos interceptan presas del zooplancton



3. La ascidia colonial extrae finas partículas del agua filtrándola a través de su cavidad branquial



4. Colonia de un briozoo cuyos zoides obtienen células de fitoplancton mediante sencillos movimientos filtradores y por intercepción



5. Penacho de un poliqueto que le sirve para capturar todo tipo de pequeñas partículas, desde bacterias a diminutos organismos del zooplancton

Jardines botánicos y parques zoológicos de tiempos remotos

Hace más de cuatro mil años que los gobernantes de Egipto y de Mesopotamia, que levantaron pirámides e imperios, se dedicaron por primera vez a un pasatiempo diferente: la colección de animales exóticos y el cultivo de jardines ornamentales

Karen Polinger Foster

Nadie diría lo dilatada que es la historia de los parques zoológicos y de los jardines decorativos. La escritura se inventó hace unos cinco mil años, época por la que también se establecieron las primeras ciudades; setecientos años después de tan trascendentales acontecimientos los faraones egipcios ya habían levantado sus famosas pirámides, los reyes de Mesopotamia habían erigido el primer imperio del mundo y los gobernantes respectivos habían creado parques zoológicos y jardines botánicos.

Los primeros se ampliaron durante los dos milenios siguientes con la inclusión de animales como jirafas, guepardos y monos de Africa, focas del Mediterráneo y osos y elefantes de Asia. Los jardines contaban muchas veces con bosquecillos de árboles raros, aviarios de pájaros exóticos y un estanque central plagado de peces inusuales.

Las imágenes que ofrecemos reproducen algunos de los testimonios plásticos mejor conservados de los zoos y de los jardines primigenios. Los datos artísticos egipcios más abundantes proceden de tumbas cuyas fechas abarcan los años 2500 al 1400 a.C.; los relativos a Mesopotamia provienen de los relieves palaciegos asirios de entre 880 y 627 a.C. Los abundantes registros escritos —realizados sobre tablillas de arcilla, sobre papiros y por las paredes de tumbas y palacios— describen cómo los reyes y los poderosos hicieron zoológicos y jardines tanto por puro placer como por razones de prestigio y de curiosidad científica. Se nos cuenta que muchos de los animales, semillas y esquejes provienen de tierras distantes, propósito con el que muchas veces se organizaron expediciones. Otras veces se trataba de regalos de gobernantes amigos o de pueblos conquistados. Orgullosos de sus colecciones, sus dueños procuraron que se reprodujeran y que continuaran aumentando, empleándose cuidadores y jardineros para atender a los ejemplares más exigentes y a la flora delicada, al tiempo que se instalaron innovadores mecanismos de riego.

El orgullo real es evidente, por ejemplo, en un relato contenido en un texto y en varios relieves pintados del complejo funerario de la faraona Hatshepsut, en Tebas. Hacia 1460 a.C. Hatshepsut tuvo la inteligente idea de procurarse muestras de mirra del cuerno de Africa para llevar a cabo una plantación en Egipto. La mirra importada, necesaria para el incienso y para la momificación, era muy costosa. "Nunca se trajo nada parecido", proclamaba, "por ningún rey que lo fuera desde los orígenes". Hatshepsut se procuró de paso algunos babuinos para el zoo real. Según indican otros textos, su sucesor, Tutmés III, se deleitaba en un zoo que incluía cuatro aves indias "que ponían huevos diariamente", las primeras gallinas domésticas de Egipto.

Un rey de Mesopotamia, Asurnasirpal II de Asiria, alardeaba en el siglo IX a.C.: "He recolectado manadas y las he sacado adelante para que se multiplicaran. En todas las tierras por las que he viajado y en las colinas que he atravesado, registré y recolecté los árboles y las semillas." Un himno del sur de Mesopotamia del siglo XI a.C. habla de exóticas maravillas florales que "aumentaban el orgullo de la ciudad".

El vasto imperio persa absorbió Egipto y Mesopotamia entre los siglos XI y IV a.C., convirtiéndolos en provincias suyas. Los gobernantes persas siguieron coleccionando fauna y flora extranjeras, pero idearon un nuevo plan de jardín, más metódico. El jardín persa, rectangular y rodeado por altos muros, estaba dividido normalmente en cuatro secciones iguales por canales que iban a reunirse en un estanque pequeño. A estos refinados jardines de recreo se les llamaba *pairi-daēza* ("rodeados por muros"), un término que los griegos traducían como *paradeisos*. "Paraíso" se convirtió en un concepto fundamental de las concepciones cristiana e islámica durante el milenio siguiente. El antiguo jardín egipcio y mesopotámico se convirtió en el Edén de la Biblia y del Corán, un reflejo sobre la tierra de las maravillas prometidas en el cielo.



UN ELEGANTE JARDIN CON UN ESTANQUE adornaba la finca de un oficial egipcio, llamado posiblemente Nebamum, hacia 1400 a.C., de acuerdo con esta pintura encontrada en su ahora perdida tumba tebana. El estanque evidentemente albergaba patos, gansos y peces que nadaban entre los lotos. Macizos de papiros, amapolas y otras plantas con flor bordeaban el estanque. Dos variedades de sicomoros, tres clases de palmeras (datilera, doum y argun) y exuberantes viñas suministraban acogedora sombra, mientras que algunas mandrágoras estaban cargadas de fruta. La mujer que sale de entre los árboles en la parte superior derecha y disponiendo una mesa repleta de alimento y de bebida es la diosa del sicomoro.

De acuerdo con las convenciones artísticas egipcias, el pintor combinaba varias perspectivas para transmitir la mayor información posible. Una vista aérea es la mejor forma de ilustrar el contorno del jardín y la forma del estanque; una vista lateral descubre aspectos adicionales de las plantas y los animales. Para no bloquear el estanque, los árboles y los arbustos crecen hacia afuera en tres direcciones. Muchos artistas de la época habrían dibujado la fila inferior boca abajo, pero éste eligió una posición erguida, que es más natural.



FRAGMENTO DE UN RELIEVE PINTADO. Es la prueba pictórica más antigua de que la realeza del Oriente coleccionaba animales exóticos. Revela que entre las piezas recolectadas para el faraón egipcio Sahure (que gobernó del 2458 al 2446 a.C.) durante una expedición al Levante, a lo largo de la costa oriental del Mediterráneo, había osos sirios, sujetos con collar y correa. El fragmento, procedente de la pirámide del rey en Abú Sir, es parte de un relato gráfico que adornaba el templo mortuorio de Sahure, un tipo de tumba faraónica utilizada para rendir culto a un rey muerto. Los relieves que cubren la pared norte representan a los viajeros en su ruta marítima hacia el Levante; en los de la pared opuesta se cuenta el viaje de vuelta, siendo en los que aparecen los osos. No se sabe dónde estuviera situado el bestiario real y ni si se entrenaba a los osos para que actuasen.

El artista tuvo que haber visto por sí mismo a los animales, puesto que sus uñas largas, su pesada forma de andar y sus expresiones de desconcierto son de un naturalismo que impresiona. Los comerciantes también importaron vasijas sirias de una sola asa (como la situada en la parte inferior izquierda) llenas de productos levantinos, así como enormes troncos de cedro, muy apreciados en Egipto.



MODELO DE JARDIN EN UNA CAJA. Es el único diorama de jardín egipcio conocido. Se encontró en la tumba de Meket-Re en Tebas, un oficial egipcio de alto rango de hacia 2010 a.C. Los sicomoros (hechos de madera y con hojas insertadas individualmente) rodean una cuba rectangular recubierta de cobre, que en otro tiempo debió de contener agua. Al fondo hay una galería sostenida por columnas de madera llamativamente decoradas con un diseño inspirado en haces de tallos de lotos y papiros. Tres pequeños caños de drenaje sobresalen del techo de la galería.

Desde el 2500 al 1900 a.C., aproximadamente, los modelos de madera complementaron las decoraciones de las paredes de las tumbas, reproduciendo aspectos de la vida diaria. Muchos eran cajas que representaban el aspecto interior de diversos recintos, como los graneros y los mataderos. Otros eran maquetas, entre los que se cuentan barcos en miniatura con velas de tela extendidas y redes llenas de diminutos peces de madera. Aunque en el jardín de Meket-Re no aparezcan personas, la mayoría de los modelos incluyen operarios de madera ocupados en sus tareas.

DESFILE DE ANIMALES EXOTICOS contenido en una pintura mural de la tumba de Rekmire en Tebas. Rekmire fue un funcionario de alto rango que sirvió a los reyes egipcios Tutmés III y Amenotep II a finales del siglo XV a.C. Expediciones periódicas de naturaleza militar y comercial realizadas durante sus reinados extendieron la influencia imperial de Egipto hacia el sur, hasta Nubia, y hacia el norte, hasta el Levante, pudiéndose ver animales de ambos confines en la pintura. En la parte superior los nubios conducen perros de caza, ganado vacuno de largos cuernos y una joven jirafa de cuyo cuello cuelga un mono verde. Los sirios entran por la parte inferior con un elefante, un oso y caballos, además de transportar lingotes de cobre, colmillos de elefante y diversas vasijas.

La representación de la jirafa es especialmente chocante. Observándola de cerca se ve que las manchas del animal son pequeños rombos (*detalle*). Mediante esta sutil alteración geométrica el artista refleja un aspecto político: de la misma forma en la que esta extraña bestia de Africa se ajusta ahora a los motivos decorativos egipcios, los nubios han sido obligados a someterse a la dominación egipcia.





MONOS CON CORREA llegaron a la corte asiria de Asurnasirpal II en Mesopotamia junto con muchos otros animales, incluyendo elefantes, osos, ciervos raros y “criaturas marinas” mediterráneas (probablemente delfines, focas y similares). En 879 a.C. el rey fundó un nuevo palacio y un centro administrativo en Nimrud. Poco después aumentó sus adquisiciones de fauna exótica. Estas figuras pertenecen a relieves de la sala del trono, que representan a extranjeros ofreciendo productos de lujo a la corte; la inscripción que se extiende horizontalmente como una cinta es un texto ritual de alabanza al rey. Se sabe que allí había recintos cerrados para los animales, así como extensos jardines y zonas verdes, pero no se ha encontrado rastro alguno de ellos.

El estilo de los relieves de Asurnasirpal muestra una cuidada composición y la yuxtaposición de formas y texturas. Por ejemplo, la cola del mono de la parte inferior se sitúa por encima del pie de su portador, dejando visible la puntera puntiaguda de su zapato. La piel punteada del animal contrasta con los flecos estriados de la vestimenta humana. El artista ha organizado además las figuras de manera se disponga del suficiente espacio para permitir una visión despejada de la cabeza y de las patas delanteras del mono, que muestran un gran parecido con las humanas.



EL OBELISCO NEGRO del palacio de Salmanasar III en Nimrud relata las múltiples campañas militares del rey y los tributos que recibía de todos los rincones de su imperio durante su reinado (del 858 al 824 a.C.) mediante veinte paneles en bajorrelieve y las inscripciones que corren paralelas a los bordes superiores e inferiores. El lateral que puede verse a la izquierda muestra criaturas traídas para el rey desde el este: un par de camellos "cuyas espaldas están duplicadas", un elefante indio y dos simios. Es evidente un cambio en el estilo artístico del obelisco: las figuras pertenecientes al reinado de Salmanasar III muestran rasgos más escultóricos que los relieves más tempranos y relativamente lineales de Asurnasirpal II.



LA RESERVA DE ANIMALES representada sobre estas líneas fue proyectada con gran cuidado por el rey asirio Senaquerib en lo que él llamaba "su palacio sin rival", construido en Nínive hacia el 700 a.C. Senaquerib puso mucho cuidado en crear parajes naturales para criar animales foráneos e indígenas. El texto afirma que "las plantaciones tuvieron un enorme éxito; las garzas que venían de lejos anidaban y los cerdos y demás animales producían crías en gran número". El relieve incluye, hacia su parte central izquierda, a una prolífica cerda caminando con sus lechones; sobre ella se encuentra un ciervo casi escondido entre los juncos entrelazados.

El rey prestaba la misma atención a sus elaborados jardines (*que no aparecen representados*). Un estudio reciente de Stephanie Dalley defiende que los legendarios Jardines Colgantes, más que ser la obra del babilonio del siglo VI Nabucodonosor, eran de hecho los renombrados jardines de Senaquerib, a muchas millas hacia el norte.



LA FIESTA EN EL JARDIN, que recuerda este relieve, fue ofrecida por el nieto de Senaquerib, Asurbanipal, que gobernó hasta el 627 a.C. Asurbanipal preservó las creaciones de Senaquerib y mantuvo también sus propios jardines y zoos. El relieve, de su palacio del norte en Nínive, le representa celebrando una victoria sobre Elam, un reino situado hacia el sudeste. Está reclinado sobre un lecho de marquetería, con el codo apoyado en un cojín y levantando la copa por su reina. Los sirvientes abanican a la pareja real, les traen refrescos y tocan arpas y otros instrumentos. La escena completa parecería una bucólica delicia de no ser por un truculento detalle: la cabeza cortada del rey elamita cuelga (boca abajo) de una argolla situada en un árbol de la izquierda (entre dos palmeras). Su desagradable olor podría explicar por qué Asurbanipal y su reina sostenían ramilletes de jazmín y tenían cerca un par de quemadores de incienso.

Asurbanipal ignoraba que los días de Nínive estaban contados. Sus enemigos del este, los medos, saquearon la capital en el 612 a.C., poniendo fin al imperio asirio. Sus zoos y jardines, el orgullo de generaciones de reyes asirios, fueron abandonados y se convirtieron en ruinas.

KAREN POLINGER FOSTER, doctorada en lenguas y civilizaciones de Oriente Próximo por la Universidad de Yale, es miembro invitado del profesorado de Yale y está escribiendo su tercer libro erudito, *Gardens of Eden: Exotic Flora and Fauna in Mesopotamia, Egipt, and the Aegean*. También ha terminado un libro infantil, *The City of rainbows: A Tale from Ancient Sumer*, recién publicado por el Museo de Arqueología y Antropología de la Universidad de Pennsylvania.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE GARDEN: AN ILLUSTRATED HISTORY. Julia S. Berrall. Viking Press, 1966.

ANIMALS IN ARCHAEOLOGY. Dirigido por A. Houghton Broderick. Praeger, 1972.

ATLAS OF ANCIENT EGYPT. John Baines y Jaromir Málek. Facts on File, 1980.

CULTURAL ATLAS OF MESOPOTAMIA AND THE ANCIENT NEAR EAST. Michael Roaf. Facts on File, 1990.

NINEVEH, BABYLON AND THE HANGING GARDENS: CUNEIFORM AND CLASSICAL SOURCES RECONCILED. Stephanie Dalley en *Iraq* (revista de la British School of Archaeology in Irak, Londres), vol. 56, páginas 45-58; 1994.

THE ANIMAL WORLD OF THE PHARAOHS. Patrick F. Houlihan. Thames and Hudson, 1996.

THE MODERN ARK; THE STORY OF ZOOS, PAST, PRESENT, AND FUTURE. Vicki Croke. Charles Scribner's Sons, 1997.

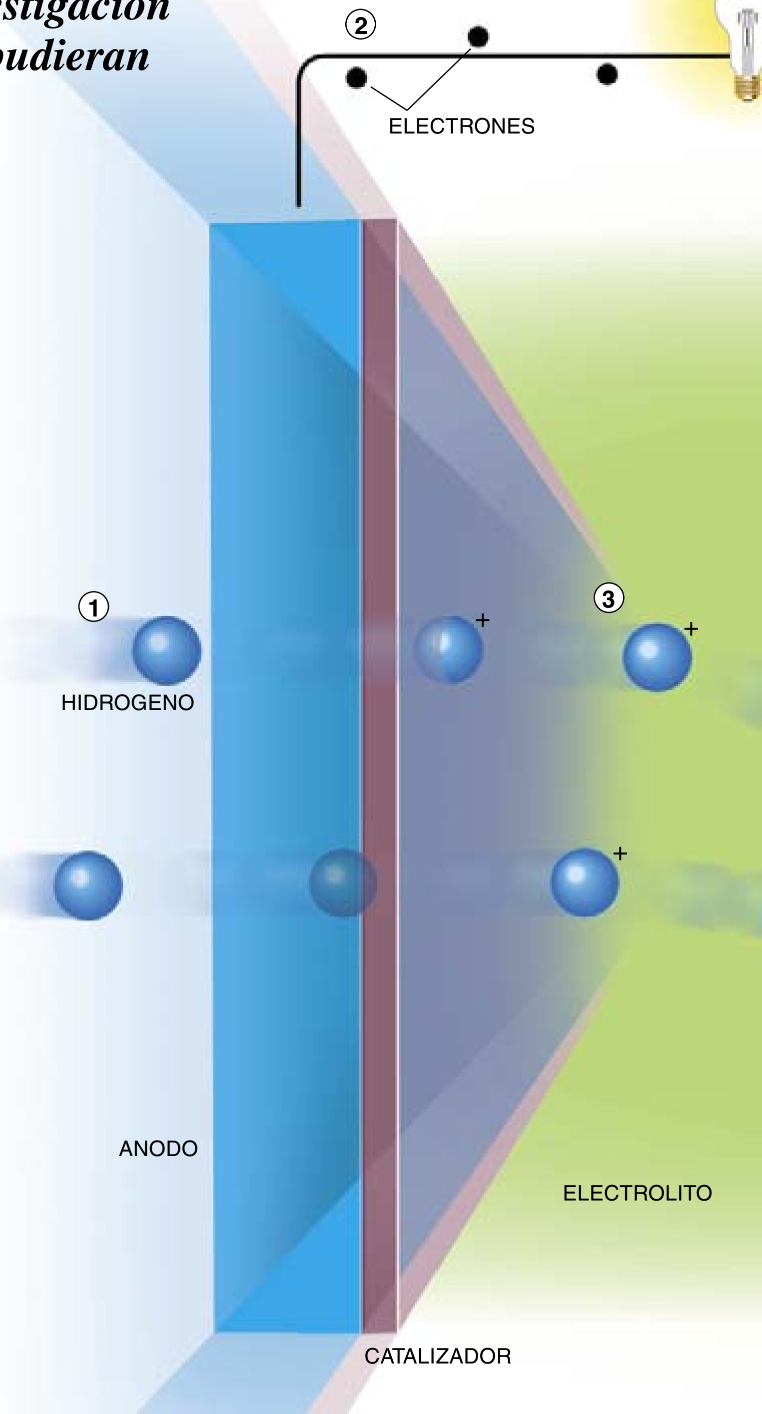
FUTURO DE LAS PILAS

Por muchos que sean los obstáculos para una producción práctica de pilas de combustible, la continua investigación y los aciertos de la ingeniería pudieran llegar a hacerlas populares

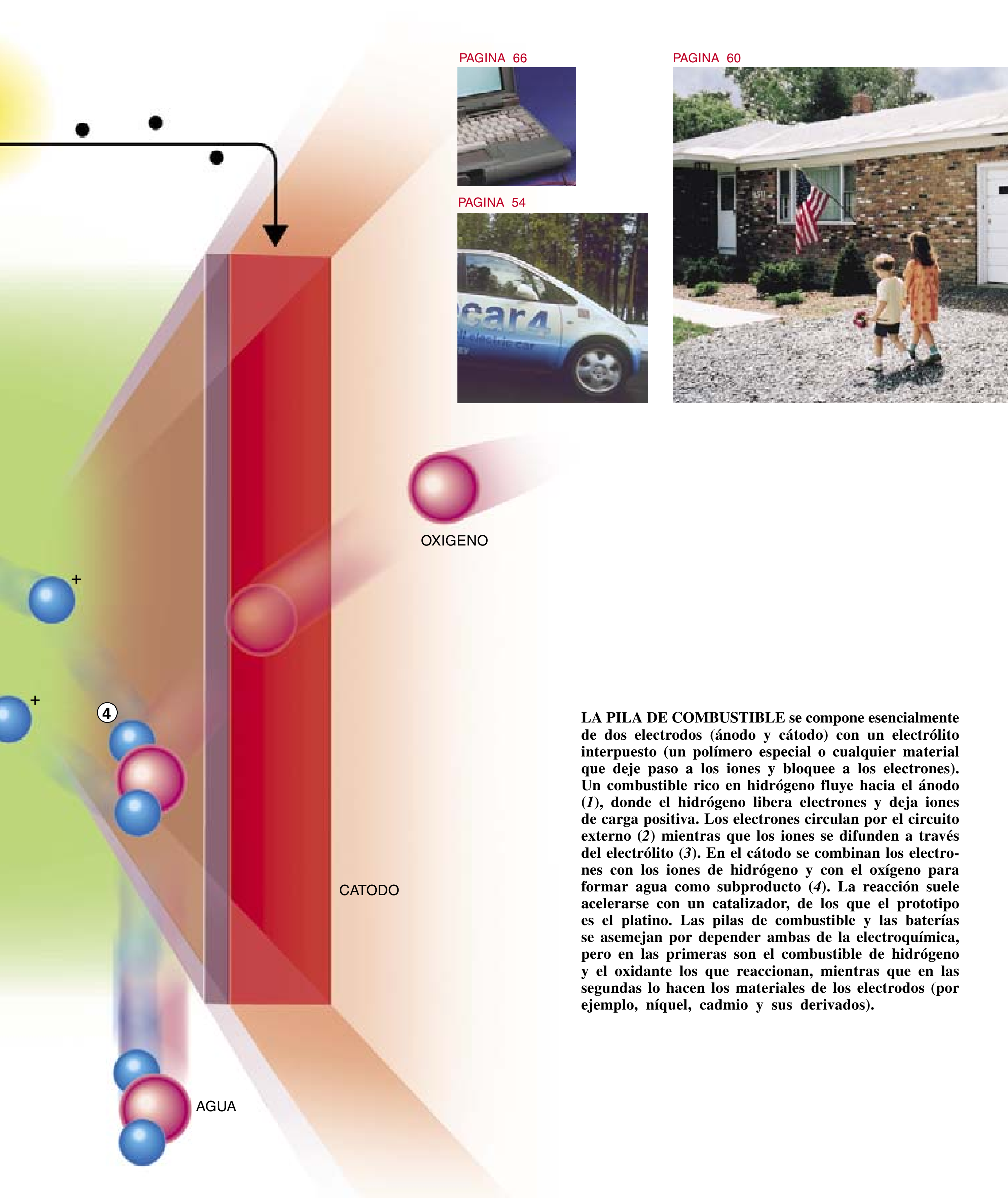
El físico británico William R. Grove demostró en 1839 que la unión electroquímica del hidrógeno y el oxígeno genera electricidad. Pero las pilas de combustible basadas en esta idea apenas fueron rarezas de laboratorio durante más de un siglo, hasta que en los años sesenta la NASA comenzó a producir versiones ligeras —y caras— para el suministro de energía eléctrica de los vehículos espaciales. Esta técnica, de funcionamiento limpio y silencioso, sería ideal para multitud de aplicaciones actuales, como los teléfonos móviles, los ordenadores portátiles, los automóviles y los generadores de uso doméstico.

Pero quedan por superar numerosos obstáculos. En primer lugar están los relativos al propio combustible. El hidrógeno líquido, que alberga una gran energía, tiene que almacenarse a temperaturas prohibitivas, apenas superiores al cero absoluto. Hay abundante hidrógeno en el metanol, que es líquido a temperatura ambiente, pero su extracción exige una embarazosa conversión química, con el frecuente concurso de costosos catalizadores de platino. Circunstancias como éstas complican el proyecto básico de las pilas de combustible, a las que muchas veces han de incorporarse complicados subsistemas.

Son varios los grupos investigadores de todo el mundo que se esfuerzan impertérritos por afinar esta técnica hasta llevarla al terreno práctico. Se ha conseguido así reducir en más de un 30 por ciento las necesidades de platino de cierto tipo de pila. Diversos especialistas nos describen a continuación el estado actual de este tipo de generadores en tres campos distintos: la locomoción, en la que es difícil derrotar a los motores de explosión; las aplicaciones fijas, hoy más centradas en los pequeños equipos domésticos que en los generadores de grandes potencias para las redes eléctricas; por último, la electrónica portátil, en la que las pilas de combustible miniaturizadas podrían sustituir a las baterías recargables.



DE COMBUSTIBLE



LA PILA DE COMBUSTIBLE se compone esencialmente de dos electrodos (ánodo y cátodo) con un electrólito interpuesto (un polímero especial o cualquier material que deje paso a los iones y bloquee a los electrones). Un combustible rico en hidrógeno fluye hacia el ánodo (*1*), donde el hidrógeno libera electrones y deja iones de carga positiva. Los electrones circulan por el circuito externo (*2*) mientras que los iones se difunden a través del electrólito (*3*). En el cátodo se combinan los electrones con los iones de hidrógeno y con el oxígeno para formar agua como subproducto (*4*). La reacción suele acelerarse con un catalizador, de los que el prototipo es el platino. Las pilas de combustible y las baterías se asemejan por depender ambas de la electroquímica, pero en las primeras son el combustible de hidrógeno y el oxidante los que reaccionan, mientras que en las segundas lo hacen los materiales de los electrodos (por ejemplo, níquel, cadmio y sus derivados).

Motores electroquímicos

Las pilas de combustible pueden propulsar coches y autobuses más limpios, pero hay importantes obstáculos técnicos y económicos que retrasarán su adopción universal

A. John Appleby

Cuantos más coches, autobuses y camiones circulan por las carreteras, más se siente la necesidad de buscar alternativas a los clásicos motores de combustión. Las mayores reservas petrolíferas del mundo yacen en el Medio Oriente, de dudosa estabilidad política, y en todo caso no pueden durar indefinidamente. Es bien conocida la amenaza para la salud que entrañan los óxidos de nitrógeno y otras sustancias que desprenden los tubos de escape, a la par que crece la preocupación por las emisiones de dióxido de carbono, causantes del efecto invernadero. Pese a las mejoras en limpieza y rendimiento que presentan los nuevos automóviles, predomina el deterioro ambiental que acompaña al rápido incremento del número de vehículos, sobre todo en los mercados asiáticos. En 1996 circulaban unos 634 millones de vehículos por todo el mundo, casi un 30 por ciento más que diez años atrás, y según datos de la Agencia Internacional de la Energía, emitían en total unos 3700 millones de toneladas de dióxido de carbono.

Los fabricantes de automóviles investigan diversas maneras para reducir drásticamente las emisiones nocivas. Muchos ven como solución prometedora el uso de pilas de combustible electroquímicas para alimentar motores de tracción eléctrica. Al contrario que las populares baterías de acumuladores, que almacenan una cantidad fija de energía entre sus electrodos, las pilas de combustible siguen funcionando mientras se las alimente con combustible y oxidante, o por lo menos hasta que sus componentes se degraden.

Casi todos los grandes fabricantes han programado la producción de pilas de combustible para automóviles; recientemente se han realizado demostraciones públicas. Daimler-Chrysler y General Motors anuncian el lanzamiento al mercado de algunos coches de turismo en 2004 y la compañía londinense Zevco proyecta fabricar en Nueva York pilas de combustible para vehículos comerciales.

Aunque sea reciente la difusión pública de este tipo de propulsión eléctrica para vehículos, en realidad el empleo de pilas de combustible para tracción se remonta a los años cincuenta. Y con ellas se han alimentado todos los vuelos espaciales tripulados desde el Proyecto Géminis en 1965.

Alternativas químicas

Las pilas de combustible para automoción pueden utilizar distintas sustancias químicas como electrólito (material que une eléctricamente los electrodos en el interior de la pila). El hidrógeno suministrado al ánodo (que, en este contexto y a diferencia de la denominación usual, es el terminal negativo) reacciona con él y desprende electrones. La corriente resultante circula por un circuito externo hacia el cátodo (terminal positivo), en el cual los electrones se combinan con oxígeno. Los iones fluyen a través del electrólito, completando el circuito. El único subproducto desechable es el agua. En principio pueden utilizarse combustibles distintos del hidrógeno, pero en tal caso los productos de la reacción "envenenarían" el catalizador, reduciendo la tensión de salida y el rendimiento. Las pilas que operan a temperaturas suficientemente bajas para aplicaciones móviles incorporan un catalizador, que suele ser el platino, con el fin de acelerar las reacciones hasta valores prácticos.

La conversión directa de energía química a energía eléctrica en una pila de combustible puede, en teoría, alcanzar un rendimiento muy elevado. Pero

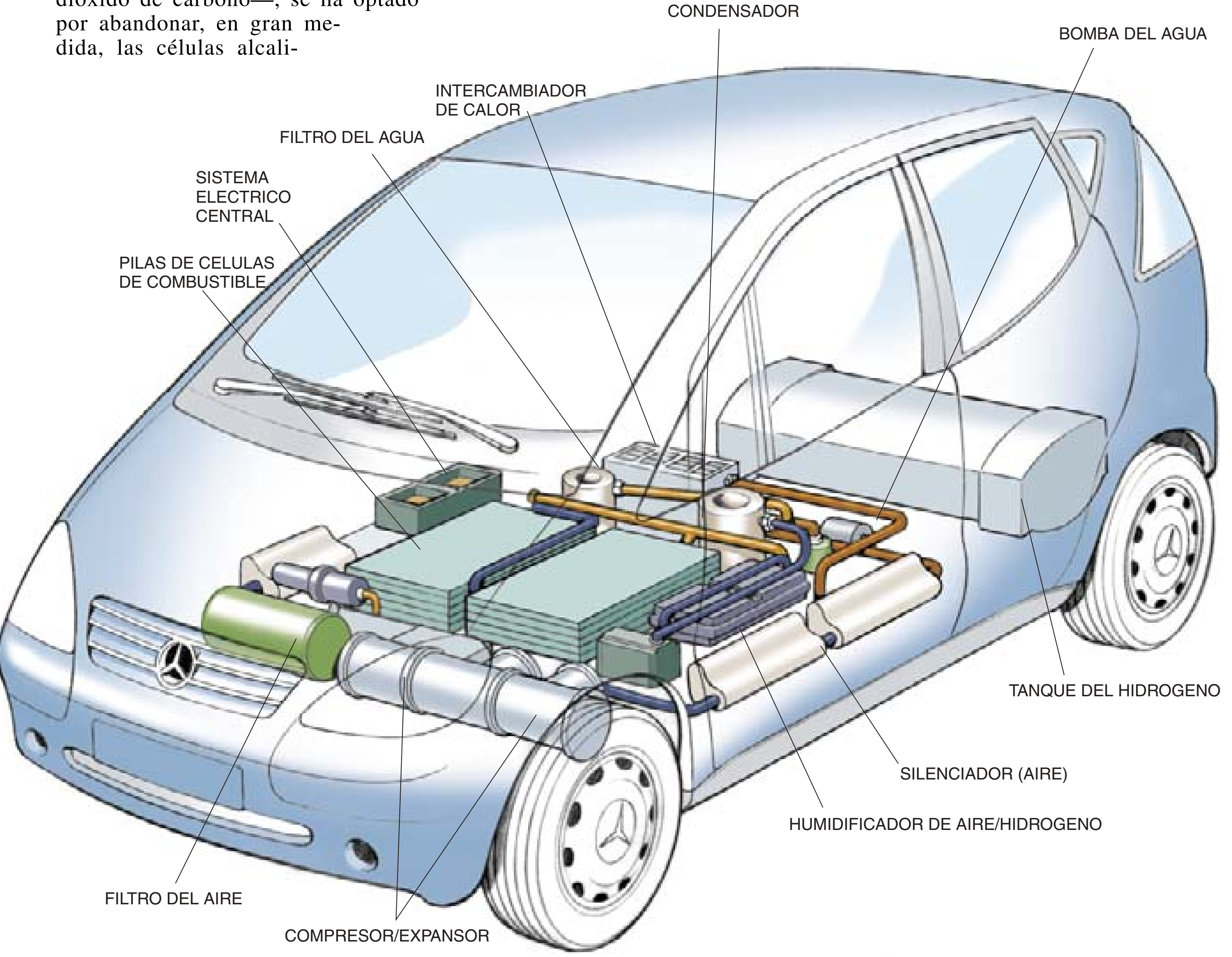
1. MODERNO COCHE PROPULSADO POR PILA DE COMBUSTIBLE, el Necar 4 de DaimlerChrysler, en el que la electricidad se genera por pilas montadas bajo el piso. Un compresor las mantiene a presión. El aire y el hidrógeno combustible se preparan en un humidificador y un intercambiador de calor, recogiendo un condensador el agua residual. El combustible de hidrógeno líquido se almacena en un tanque criogénico. Un radiador refrigerado por aire (*no visible en la figura*) elimina el calor sobrante.

la lentitud con que reacciona el oxígeno en el cátodo lo limita en la práctica a entre un 45 y un 60 por ciento, incluso con los mejores catalizadores de platino o de aleaciones de platino. Con todo, todavía sobrepasa al que consiguen los motores de explosión de los automóviles actuales, que en condiciones ideales podría llegar al 35 por ciento, pero que realmente ronda el 15 por ciento. Un motivo del superior rendimiento de las pilas de combustible es que no tienen que seguir funcionando cuando el vehículo está parado.

El rendimiento de estas células sufre también pérdidas apreciables por la resistencia eléctrica del electrólito y por las variaciones de su concentración entre unos puntos (microscópicos) y otros. Las pérdidas se reducen al mínimo empleando electrólitos muy ácidos o muy alcalinos.

El primer vehículo propulsado por pilas de combustible fue un tractor de Allis-Chalmers, en 1959, que utilizó células de tipo alcalino que funcionaban con hidrógeno comprimido y con oxígeno. Tenían el inconveniente de necesitar hidrógeno totalmente exento de dióxido de carbono, so pena de que éste reaccionara con el electrólito para formar un carbonato sólido. Dado que muchos sistemas implican la generación de hidrógeno a bordo a partir de otros combustibles —proceso que produce algo de dióxido de carbono—, se ha optado por abandonar, en gran medida, las células alcalinas, pese a que ofrecen muy buenas perspectivas cuando se dispone de hidrógeno industrialmente puro. Su construcción admite materiales económicos y en los años ochenta se logró fabricar cátodos que no fueran sensibles a los carbonatos, disminuyendo así la susceptibilidad al dióxido de carbono. Por añadidura, las células alcalinas pueden funcionar con mucho menos platino que las pilas de combustible ácidas.

Los electrólitos ácidos no son sensibles al dióxido de carbono, pero tienen sus propias limitaciones. Los ácidos típicos requieren agua líquida para conducir los iones hidrógeno, de manera que las pilas han de funcionar por debajo del punto de ebullición del agua. Esta exigencia condiciona el rendimiento. El ácido fosfórico concentrado es, sin embargo, una excepción y las pilas que lo utilizan pueden trabajar a 200 grados centígrados. Desde los primeros años noventa hay hospitales y hoteles que utilizan pilas de ácido fosfórico que funcionan a temperatura ambiente con un combustible rico en hidrógeno obtenido del gas natural. Se han empleado pilas de tipo semejante para propulsar autobuses urbanos, pero necesitan un largo período de calentamiento —varias horas— y por ello no es probable que se utilicen en vehículos comerciales.



Como los ácidos acuosos son volátiles o inestables, en los años sesenta se comenzó a experimentar con polímeros sintéticos como electrólitos. Las versiones modernas, como el Nafion de Du Pont, contienen grupos de ácido sulfónico que dejan circular fácilmente los protones a través de ellos. El material constituye una membrana que separa los electrodos. Este diseño, una pila de combustible con membrana de intercambio de protones que funciona a unos 80 grados, se considera hoy la técnica de vanguardia para automoción. Como tal, se ha utilizado en las demostraciones más recientes de pilas de combustible.

La célula con membrana de intercambio de protones depende del platino como catalizador. Lo habitual es que se depositen partículas de este metal de diámetro equivalente a unos 10 átomos —el tamaño más pequeño que ha podido lograrse— en la superficie de finas partículas de carbono. El elevado precio del platino siempre ha sido determinante para retrasar el desarrollo comercial de estos dispositivos. En 1986 se necesitaban alrededor de 16 gramos por kilowatt de potencia producida. Y estos 16 gramos costarían, a precios de hoy, unas 28.000 pesetas, muy por encima de lo que admite el mercado. No olvidemos que un automóvil necesita producir 50 kilowatt para acelerar, aunque podría conseguirse un diseño híbrido con una pila de combustible que suministre unos 15 kilowatt y una batería de socorro para cubrir los períodos de máxima demanda de potencia.

El platino, metal precioso

A finales de los años ochenta y principios de los noventa, en el Laboratorio Nacional de Los Alamos y en el centro de investigación que yo dirijo en la Universidad A&M de Texas, se han hecho grandes progresos para reducir la cantidad de platino que necesitan las células con membranas de intercambio de protones. Más recientemente ha habido notables contribuciones de varias empresas comerciales. Las células modernas típicas suelen utilizar platino a razón de 1000 a 1200 pesetas por kilowatt, lo que mejora treinta veces los valores de 1986. Mediante perfeccionamientos estructurales de los electrodos y utilizando mejor el platino todavía podría reducirse la cantidad de metal necesaria aproximadamente a la mitad, pero no más, salvo que haya descubrimientos imprevistos. No se ha encontrado hasta ahora nada que pueda sustituir al platino en ambos electrodos.



2. AUSTIN A40 SEDAN al que Karl Kordesch equipó con pilas de combustible alcalinas de Union Carbide en 1966. Su importancia no pasa de histórica, pues el vehículo no era muy práctico: las pilas ocupaban gran parte del espacio de los pasajeros. En el techo se destacan las bombonas de hidrógeno líquido.

La unidad membrana-electrodo de una célula moderna no tiene más que 2,5 milímetros de espesor. El cátodo de una célula y el ánodo de la célula adyacente están separados físicamente por una placa que los conecta eléctricamente en serie. En ambas caras de la placa hay canales de distribución de gas o materiales porosos por los cuales el hidrógeno y el oxígeno llegan fácilmente a los electrodos. Las placas pueden contener también canales para la circulación de agua refrigerante.

Un generador práctico consta de una serie de unidades y placas atornilladas que forman una “pila”. Ballard Power Systems de Vancouver, Canadá, desarrolló en 1989 una pila de 45 kilogramos y unos 30 litros de volumen que producía cinco kilowatt de potencia a partir de gas hidrógeno y aire presurizado. Aun siendo un logro impresionante, todavía contenía excesivas cantidades de platino, a razón de 12.000 pesetas por kilowatt. En 1995 Ballard anunció una pila muy perfeccionada, capaz de competir en prestaciones con el motor de explosión. Su peso y volumen eran iguales que los de su predecesora, pero generaba 32,3 kilowatt con un rendimiento del 54 por ciento. En autobuses de Vancouver y de Chicago, así como en coches experimentales de DaimlerChrysler, se han utilizado pilas Ballard de diversos tipos.

Los automóviles exigen mejores prestaciones que los autobuses. Los fabricantes de automoción estadounidenses que cooperan en una iniciativa federal —la Asociación en pro de una nueva generación de vehículos— han elegido las pilas de combustible con membrana de intercambio de protones como una de las dos atractivas técnicas que pueden ayudar a alcanzar la meta de este proyecto: el desarrollo de un coche de turismo con un bajísimo nivel de emisiones. (La otra técnica es híbrida, un motor de explosión de gran rendimiento acoplado con baterías.) La lección aprendida en el mundo del automóvil es que un “motor electroquímico” —una pila de células de combustible que alimenta motores eléctricos— podría competir económicamente con un motor de explosión si el coste pudiera rebajarse hasta 8000 pesetas por kilowatt.

Con el tiempo esto podría ser factible. Hay dos opciones en competencia. Una, ya indicada anteriormente, consiste en combinar una pila de combustible con una batería que proporcionaría potencia adicional en caso necesario. Esta disposición permite utilizar el frenado regenerativo: cuando el vehículo aminora la marcha, los motores de tracción actúan como frenos que generan energía para recargar la batería. La batería puede además suministrar potencia en el arranque si el vehículo cuenta con un sistema de producción de hidrógeno que necesite un tiempo de calentamiento. El rendimiento global de un sistema de este tipo puede rondar el 40 por ciento. Se ha utilizado en varios vehículos, entre

A. JOHN APPLEBY se formó en metalurgia y electroquímica en la Universidad de Cambridge. Durante más de treinta años ha estudiado la electroquímica de todos los tipos de células de combustible comunes, incluyendo sistemas bioquímicos. En los años setenta investigó en los Laboratorios Marcoussis de la Compagnie Générale d'Électricité (Francia), y de ahí pasó al Electric Power Research Institute en Palo Alto (EE.UU.) para dirigir técnicas avanzadas de células de combustible. También ha sido profesor consultor de ingeniería química en la Universidad de Stanford. Desde 1987 enseña electroquímica aplicada y dirige el Centro de sistemas electroquímicos e investigación del hidrógeno en la Universidad A&M de Texas.

ellos autobuses propulsados por pilas experimentales de ácido fosfórico.

La otra opción es la del motor electroquímico, sin batería suplementaria ni frenado regenerativo. Ballard siguió esta estrategia en sus autobuses alimentados por pilas de combustible con membrana de intercambio de protones. Se puede así alcanzar un rendimiento del 50 por ciento con una carga media. Pero al exigirse una mayor potencia de la pila de combustible, su coste también será más alto. La producción mundial de platino es además limitada y existe demanda de dicho metal para muchas otras aplicaciones. Si se equiparan con motores electroquímicos de 50 kilowatt dos millones de coches por año —en torno al 5 por ciento de la producción actual— se consumirían 50 toneladas métricas de platino, alrededor de un tercio de la producción mundial actual de dicho metal. Esto parece indicar que los vehículos puros de pilas de combustible con membrana de protones no predominarán en el mercado mundial del futuro. Los vehículos híbridos, que conjugan una batería y una pila de combustible de menor tamaño, podrían fabricarse en cantidades mucho mayores, especialmente si las células de combustible son alcalinas, ya que las de este tipo no necesitan más que la quinta parte de platino que los modelos con membrana de intercambio de protones. Zevco está siguiendo este camino.

Alcanzar el máximo rendimiento

En un informe de julio de 1998 dirigido a la Junta de recursos atmosféricos de California se estimaba que hacia julio del 2000 la industria de automoción habrá invertido de 150.000 a 250.000 millones de pesetas en pilas de combustible con membrana de intercambio de protones. Con todo, para lograr una aceptación general en los años venideros, este tipo de propulsión tiene que presentar claras ventajas económicas sobre los sistemas híbridos de baterías y de motor de explosión que sin duda van a aparecer; no basta con que las emisiones contaminantes sean despreciables.

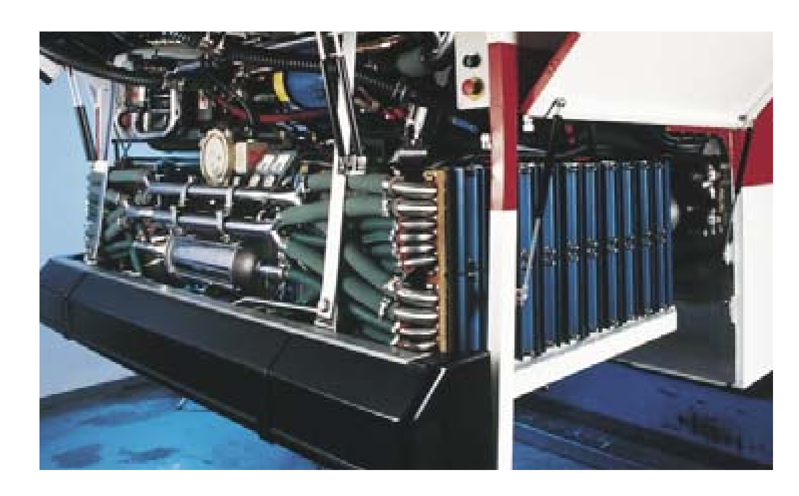
Persiguiendo una mayor eficacia y por tanto un mejor comportamiento económico, se han probado células sometidas a varias atmósferas de presión, lo que aumenta la velocidad de difusión y de reacción del oxígeno. De este modo puede reducirse, aunque no demasiado, la cantidad de platino necesaria, pero por contra la caja externa tendrá que poder soportar la presión y la pila pesará más. Además, para lograr un buen rendimiento, hay que suministrar oxígeno en exceso; el volumen de aire a comprimir ha de ser en consecuencia mucho mayor que el volumen de aire consumido. Al ser ruidosos y poco eficaces los compresores, la presurización tiene, en suma, un valor cuestionable.

Pese a todo, Ballard ha apostado por un método que aprovecha la elevada presión del interior de las células para expulsar el agua que tiende a obstruir los canales de gas en el cátodo. Por el contrario, International Fuel Cells, empresa conjunta de United Technologies y Toshiba, ha demostrado que sin presurización pueden obtenerse células más eficaces y ligeras. A tal fin utiliza grafito permeable de poros microscópicos para controlar el movimiento del agua. Los fabricantes han probado con éxito la tolerancia de las unidades de electrodos y membrana ante la congelación y el deshielo hasta –40 grados centígrados, si bien primero hay que extraer el agua pura utilizada para enfriar y mantener húmeda la membrana.

Para reducir costes, se piensa utilizar polímeros de grafito moldeado y espumas metálicas resistentes a la corrosión en las placas que conectan los electrodos. El coste de las membranas, 15.000 pesetas por kilowatt, sigue siendo un serio obstáculo. Du Pont afirma que los precios caerán a la décima parte si se equipan 250.000 coches al año. Probablemente todavía resultarán caros, razón por la que los investigadores siguen analizando otras posibles soluciones químicas, aunque sin resultados apreciables hasta la fecha.

Para que se generalice el uso de las pilas de combustible en automoción, habrá que mejorar también los sistemas de a bordo, ya sea para almacenar el hidrógeno o para fabricarlo. Si el gas ha de suministrarse a los vehículos en su forma elemental, se necesitará una red enteramente nueva de estaciones de abastecimiento de hidrógeno.

Es fácil obtener hidrógeno a partir del gas natural. El hidrógeno de contenido energético equivalente a un litro de gasolina vendría a costar de 40 a 50 pesetas, lo que supone un coste de combustible por kilómetro muy bajo, habida cuenta de que el rendimiento de un vehículo de pilas de combustible



3. AUTOBUS construido por Ballard Power Systems en Vancouver. Funciona por las calles y lo propulsan pilas de combustible con membrana de intercambio de protones (*visibles a la derecha*). El autobús usa hidrógeno comprimido como combustible y no contamina.

VEHICULOS PROPULSADOS POR PILAS DE COMBUSTIBLE: PRINCIPALES REALIZACIONES

Fecha	Ingeniería	Vehículo	Opción técnica	Combustible y autonomía (si es conocida)
1966	Karl Kordesch	Austin A40 sedán	6kW, Union Carbide, alcalino*	Hidrógeno comprimido (HC), 320 km
1990 (*Operativo en abril del 94*)	H. Power, Univ. Georgetown, Gobierno EE.UU.	Tres autobuses de 9,1 metros	50kW, Fuji Electric, ácido fosfórico*	Metanol transformado (MT) que suministra hidrógeno
1991 (*Operativo en feb. del 93*)	Ballard Power Systems	Autobús de 9,8 metros	120 kW, Ballard Mk 5, p/membrana intercambio protones (MIP)	HC
Octubre 1993	Energy Partners	"Coche verde" deportivo	15 kW, p/MIP	HC, 100 km
Abril 1994	Daimler-Benz	Necar (furgón Mercedes 180)	60 kW, Ballard Mk 5, p/MIP	HC
Mayo 1996	Daimler-Benz	Necar 2 (furgón Mercedes clase V)	50 kW netos, Ballard Mk 7, p/MIP	HC, 250 km
Septiembre 1997	Daimler-Benz	Necar 3 (subcompacto Mercedes clase A)	(como el anterior)	MT, 400 km
Julio 1998	DaimlerChrysler	Necar 4 (como el anterior)	(como el anterior)	Hidrógeno líquido (HL), 400 km
1994-97	Ballard	Seis autobuses de 12,2 metros	205 kW netos, Ballard Mk 6, p/MIP	HC
Noviembre 1996	Toyota	Deportivo RAV4	10 kW, p/MIP*	Hidruro de metal (HM) que almacena hidrógeno, 250 km
Septiembre 1997	Toyota	Deportivo RAV4	25 kW, p/MIP*	MT, 500 km
Mayo 1997	Daimler-Benz	Nebus (autobús de 12 m O405 N)	190 kW netos, Ballard, p/MIP	HC, 250 km
Agosto 1997	Renault	Laguna familiar	30 kW, De Nora (Milán), p/MIP	HL, 500 km
Diciembre 1997	Mazda	Demio FCEV familiar	25 kW, p/MIP*	HM, 170 km
Mayo 1998	Univ. Georgetown, Nova BUS, Dept. de Transporte	Autobús de 12 metros	100 kW netos, International Fuel Cells, ácido fosfórico*	MT, 550 km
Julio 1998	Zevco	Taxi Millenium London	5 kW, alcalino*	HC, 150 km
Octubre 1998	General Motors (Opel)	Furgoneta Zafira	50 kW, p/MIP	MT

* Sistema híbrido con batería u otro dispositivo de almacenamiento; p/ = presurizado

4. VEHICULOS PROPULSADOS por pilas de combustible. La tabla muestra algunos de los vehículos más notables construidos en los últimos años según distintas técnicas. Todos están autorizados para circular por autopistas; entre ellos hay autobuses en servicio. Hay muchos otros proyectos en curso.

duplica al menos el de los automóviles actuales. Mayor complicación supone el tener que transportar en el coche tres kilogramos de hidrógeno, cantidad necesaria para recorrer 500 kilómetros en un pequeño automóvil. Téngase en cuenta que a la presión atmosférica estos tres kilogramos ocuparían 36.000 litros, el volumen de varios coches enteros.

Podría transportarse en un depósito el gas hidrógeno comprimido, pero ocuparía un volumen de 180 litros, demasiado espacio para un automóvil. Ford ha propuesto algunos diseños a base de materiales compuestos avanzados que no pesarían más que 25 kilogramos.

Como alternativa podría desarrollarse un sistema de distribución de hidrógeno líquido a escala nacional. Un tanque criogénico capaz de almacenar tres kilogramos pesaría 45 kilogramos y ocuparía 100 litros, más que un tanque de gasolina pero todavía manejable. Pero la licuefacción desperdicia el 30 por ciento de la energía del combustible y el hidrógeno tiene una ebullición muy rápida: en una semana que se deje estacionado el coche puede evaporarse todo el combustible. Y además la acumulación de hidrógeno es potencialmente explosiva.

Otra opción consiste en combinar el hidrógeno con aleaciones de las sustancias llamadas hidruros metálicos, que pueden almacenar de modo reversible hasta el 2 por ciento del gas en peso. Estos materiales son pesados y costosos, pero bastante compactos: los tres kilogramos referidos ocuparían un razonable volumen de 50 litros. Unos investigadores de la Universidad del Nordeste anunciaron el año pasado un método de almacenamiento que consiste en la absorción reversible del hidrógeno en nanofibras de carbono a temperatura ambiente. Sus resultados están por confirmar, pero sólo con que la cantidad almacenada fuera la mitad de la que se pretende, esta técnica podría reducir espectacularmente —hasta los 35 litros— el volumen necesario para alojar tres kilogramos de hidrógeno.

Llene el tanque, por favor

En vez de fabricar coches que necesitan hidrógeno como combustible, se podría optar por vehículos en los que el hidrógeno se produzca a bordo a partir de un combustible portador, como el metanol o la propia gasolina. Los coches de este tipo serían de emisiones bajísimas, pero no nulas, dado que los procesadores transportados en el vehículo crearían forzosamente algo de contaminación. DaimlerChrysler y General Motors coinciden en señalar el sistema basado en metanol como la mejor alternativa técnica al hidrógeno. Pero, como el hidrógeno, el metanol requeriría instalar nuevos y costosos depósitos y bombas en las estaciones de servicio. La “transformación” a bordo que obtiene hidrógeno a partir del metanol se verifica haciendo reaccionar éste con vapor a 280 grados en presencia de un catalizador. Las pilas de combustible con ácido fosfórico funcionan especialmente bien con transformador de metanol, pues su temperatura de funcionamiento, relativamente alta, les permite suministrar sin coste alguno el vapor que requiere este proceso. La elevada temperatura también las hace resistentes a la contaminación de las pequeñas dosis de monóxido de carbono que se producen.

En las pilas de ácido fosfórico clásicas la conversión metanol-electricidad puede alcanzar un rendimiento respetable, del orden del 50 por ciento. H. Power de Belleville, N.J., ha desarrollado varios autobuses

experimentales de este tipo en los últimos años. Su marcha era silenciosa y el rendimiento duplicaba el de los autobuses diesel, pero sólo emitían un 1,5 por ciento del monóxido de carbono y el 0,25 por ciento de los óxidos de nitrógeno tolerados por las leyes estadounidenses.

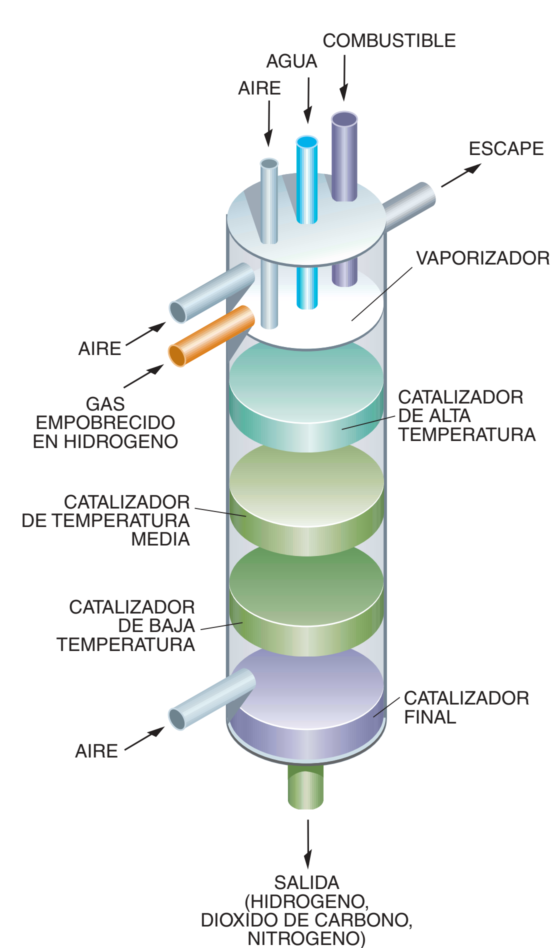
Es más difícil combinar la transformación por metanol con una pila del tipo de membrana de intercambio de protones. Ello se debe a que se necesita una etapa de conversión catalítica para reducir los niveles de monóxido de carbono del producto y aun así la célula de combustible requiere gran cantidad de aleación platino-rutenio como catalizador en el ánodo que evite su contaminación. Además se ha de quemar parte del hidrógeno obtenido en el proceso para producir el vapor que necesita la transformación. Toyota ha construido un sistema que alcanza un rendimiento global del 37 por ciento solamente. Cabe preguntarse si esto merece la pena, dado que un motor de explosión híbrido también logra ese rendimiento y el metanol cuesta el doble que la gasolina para un mismo contenido energético. A todo esto se añade que el transformador de metanol es caro y voluminoso.

DaimlerChrysler y Shell piensan que la gasolina misma podría servir como alimento de la pila de combustible, con lo cual se aprovecharía la inmensa red de gasolineras existente. Se transportaría entonces en los vehículos un procesador multicombustible, el cual obtendría hidrógeno a partir de metanol o de gasolina y quemaría parte de ese hidrógeno para producir el vapor necesario. La depuración del hidrógeno se verificaría en dos etapas. El Laboratorio Nacional de Argonne ha ensayado un sistema que convierte la gasolina del surtidor en hidrógeno con un rendimiento del 78 por ciento. Pero al considerar los factores de reducción que comporta la energía gastada en la generación de vapor y la eficacia de la pila de combustible, el rendimiento de un vehículo equipado con este tipo de sistema desciende a un vulgar 33 por ciento. Y todavía hay que perfeccionar el arranque del procesador de combustible, aunque transitoriamente pueda tomarse potencia de una batería.

Por si fuera poco, el azufre presente en toda gasolina (y en el hidrógeno obtenido de la misma) contaminará el catalizador de las células con membrana de intercambio de protones. En las pilas de ácido fosfórico para sistemas fijos se elimina el azufre del combustible antes de transformarlo en un gas rico en hidrógeno. Pero actualmente no es posible hacer esto de modo económico dentro de un vehículo.

Pueden encontrarse soluciones. Una de ellas es la de dejar que el hidrógeno se difunda a presión y temperatura elevadas a través de una membrana de paladio. Otra idea sería la producción de un combustible sintético especial exento de azufre, destinado tanto a vehículos de pilas de combustible como a motores de explosión de alto rendimiento. Pero aquí surgen nuevos interrogantes sobre la infraestructura necesaria y su coste.

No todos los grandes del automóvil han apostado por las pilas de combustible. En junio de 1998 BMW anunció que prefería dedicarse a los motores de explosión alimentados por hidrógeno, utilizando gas natural líquido como combustible intermedio.



5. PROCESADOR multicombustible que pudiera utilizarse en los vehículos para convertir gasolina o metanol en una mezcla rica en hidrógeno para las células de combustible. El gas empobrecido en hidrógeno que devuelven los ánodos de estas células se quema para calentar la mezcla de combustible, agua y aire que reacciona en el catalizador de alta temperatura. Otros catalizadores van trabajando a temperaturas cada vez más bajas, reduciendo la cantidad de monóxido de carbono y aumentando el contenido de hidrógeno de la salida.

Sin embargo, un motor de explosión especializado para hidrógeno tendrá un rendimiento menor que el de una pila de combustible optimizada y producirá óxidos de nitrógeno. Por otra parte, mientras no se haya generalizado el hidrógeno obtenido de fuentes renovables como la energía solar, su fuente de producción seguirá siendo el gas natural, con el que claramente no podrá competir como combustible.

Es probable que algún día veamos una infraestructura de distribución de hidrógeno para vehículos propulsados por pilas de combustible. Con ello se podrá mejorar y depurar el sector del transporte, reduciendo las necesidades de petróleo y rebajando las emisiones de dióxido de carbono. Tal sistema de distribución de hidrógeno se construirá cuando sea técnicamente viable, asequible y necesario. Quedan, no obstante, algunos años para conseguirlo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FUEL CELL HANDBOOK. A. John Appleby y Frank R. Foulkes. Van Nostrand Reinhold, 1989.

FUEL CELL SYSTEMS. Leo J. M. J. Blomen y Michael N. Mugerwa. Plenum Press, 1993.

FUEL CELLS AND THEIR APPLICATIONS. Karl Kordesch y Günter Simader. John Wiley & Sons, 1996.

FUEL CELL COMMERCIALIZATION ISSUES FOR LIGHT-DUTY VEHICLE APPLICATIONS. Christopher E. Borroni-Bird en *Journal of Power Sources*, vol. 61, números 1-2, págs. 33-48; 1996.

Una fábrica de energía en el sótano

Las pilas de combustible fijas eran antaño generadores gigantescos concebidos para las compañías eléctricas. Ahora hay otras más pequeñas que pueden utilizarse en las viviendas

Alan C. Lloyd

Al liberalizarse el sector de la energía eléctrica, deshaciendo el monopolio que antaño detentaran las empresas productoras de energía, ocurre que cada vez son mayores las distancias entre los compradores y los vendedores de electricidad en algunos casos. Pero dentro de diez o veinte años podrá haber quienes tengan su propia planta eléctrica, no mayor que una nevera, en el sótano o en el patio de su casa y no dependan de una central situada a cientos o a miles de kilómetros de distancia. Esto no se refiere sólo a las viviendas. También a las tiendas, las pequeñas empresas, los hoteles, los bloques de apartamentos e incluso fábricas podrían obtener electricidad del mismo modo: con pilas de combustible que suministren entre cinco y quinientos kilowatt.

Los trabajos de desarrollo de las pilas de combustible progresan activamente en empresas y laboratorios de investigación industrial de Bélgica, Canadá, Dinamarca, Alemania, Italia, Japón, Corea y EE.UU.; en algunos casos ya se están vendiendo estos equipos. Una subsidiaria de United Technologies lleva casi diez años ofreciendo pilas de combustible de hasta 200 kilowatt, de las que ha vendido unas 170 unidades, muchas de ellas utilizadas para la generación de calor y energía eléctrica en locales industriales o como reserva de potencia. Su empleo va siendo también más frecuente en plantas de tratamiento de aguas y en instalaciones "verdes", las que albergan técnicas y proyectos respetuosos con el medio ambiente.

El elevado coste de las pilas de combustible limita actualmente su empleo a éstas y a algunas otras aplicaciones especializadas, en su mayoría viables gracias a generosas subvenciones públicas. Generar un kilowatt mediante una pila de combustible viene a costar hoy de 500.000 a 600.000 pesetas, frente a las entre 80.000 y 150.000 que corresponden al generado en la turbina de una central térmica corriente. Otro inconveniente es la limitación de la vida útil; hasta ahora no ha habido pila de combustible comercial que dure más de diez años en servicio, mientras que las empresas exigen que sus generadores funcionen bien durante más de veinte años.

Las pilas de combustible presentan a su vez características deseables: son relativamente limpias y silenciosas, pueden utilizar una diversidad de combustibles y generalmente no les afectan las tormentas ni otras calamidades. Estas ventajas hacen creer a algunos en la viabilidad de las células de combustible para una gama de aplicaciones razonablemente amplia, cuando el precio del kilowatt descienda hasta unas 240.000 pesetas.

Para que las pilas de combustible alcancen estos niveles de precios y prestaciones habrán de introducirse una serie de mejoras en su fabricación y diseño. Los fabricantes se encuentran, sin embargo, muy motivados para conseguirlo. Cuanto más preocupan los dañinos efectos ambientales de los gases de invernadero desprendidos por las centrales eléctricas existentes, más esperanzas se cifran en que el creciente uso de las pilas de combustible impulse a las empresas industriales hacia una "economía del hidrógeno". La electricidad se obtendría entonces principalmente de pilas de combustible y de otros sistemas basados en el hidrógeno, así como de células solares, eólicas y otras fuentes de energía renovable —que además descompondrían el agua por hidrólisis para aportar hidrógeno a las pilas de combustible—. La transición hacia esta red energética centrada en

1. LA PILA DE COMBUSTIBLE DE OXIDO SOLIDO puede suministrar electricidad, calor y agua a una vivienda. Funciona a 800 grados y parte del calor necesario para mantener esta temperatura puede llevarse a las conducciones de calefacción de la casa (*naranja*) y al tanque de agua (*rojo*). El uso de este calor, de otro modo desperdiciado, permite aprovechar hasta el 90 por ciento de la energía química del combustible. Esta unidad, capaz de producir 10 kilowatt de electricidad, ha sido proyectada por Hydrogen Burner Technology de Long Beach, California, que la comercializará hacia el año 2003.

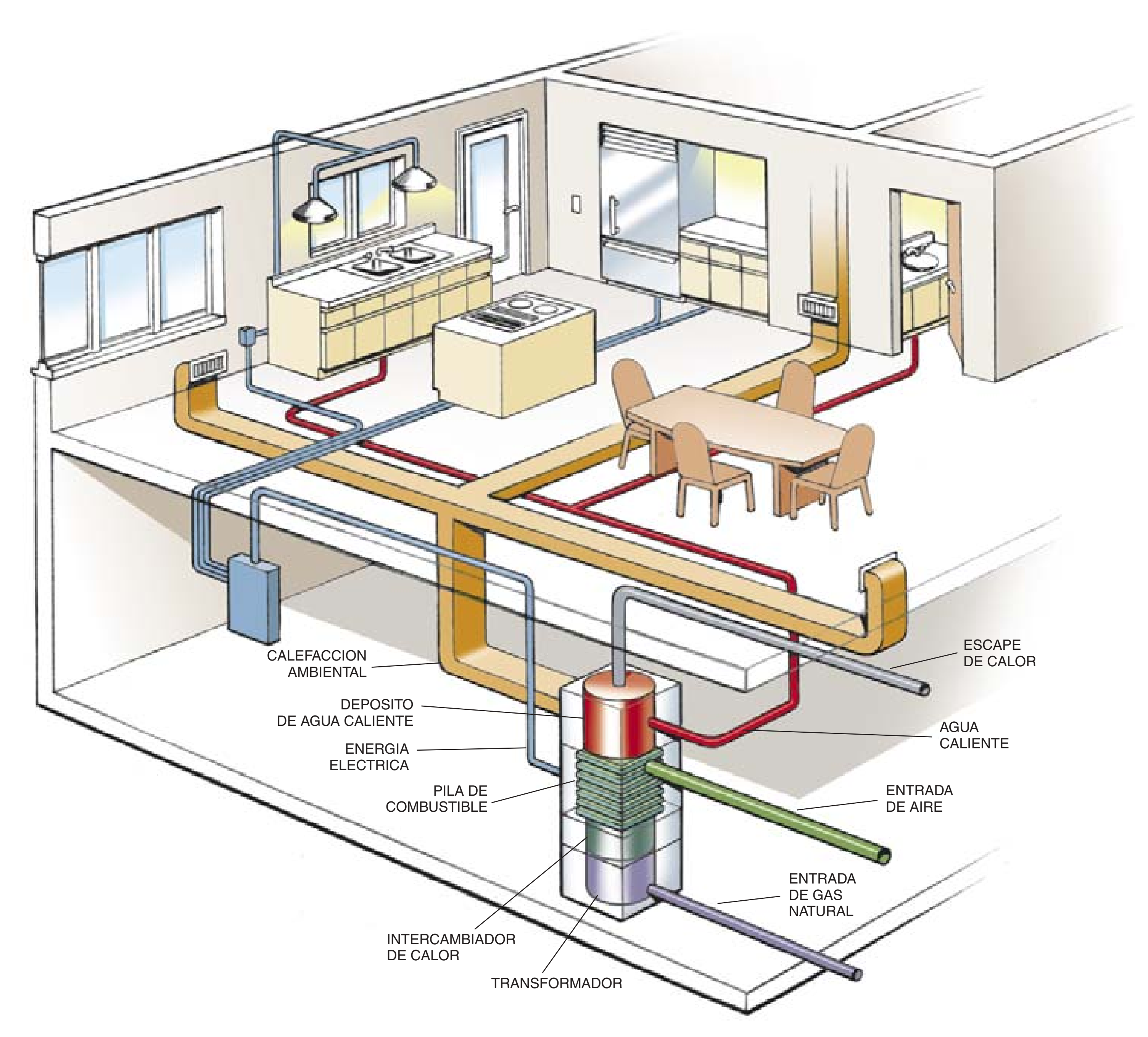
el hidrógeno se acelerará en los próximos decenios, sobre todo cuando empiecen a escasear las reservas de petróleo.

Si hay combustible, habrá energía

Las pilas formadas por células de combustible no son nada nuevo: su idea básica ha cumplido más de un siglo. A semejanza de las baterías, se presentan en una diversidad de tipos. También como las baterías, producen corriente eléctrica al interceptar los electrones que circulan de un electrodo a otro por efecto de una reacción química. La célula de combustible contiene un electrodo positivo y un electrodo negativo separados por un electrólito, material que permite el paso de átomos cargados, llamados iones.

Para que funcione la pila se hace llegar hidrógeno al electrodo negativo y oxígeno al electrodo positivo. En el electrodo negativo hay un catalizador muy conductivo, como el platino, que desaloja un electrón de cada átomo de hidrógeno y lo ioniza. A partir de ahí el ion hidrógeno y el electrón siguen diferentes trayectos hacia el electrodo positivo: el primero atraviesa el electrólito, mientras que el electrón se desplaza por un circuito externo. El recorrido de estos electrones puede utilizarse para alimentar un aparato eléctrico, como una lámpara o un motor. Los iones hidrógeno y los electrones se combinan con el oxígeno en el electrodo positivo para formar agua. (Es curioso que tal agua se utilice para beber en la lanzadera espacial, propulsada por pilas de combustible.) Para que la cantidad de corriente eléctrica generada sea útil, las células de combustible individuales se "apilan" unas sobre otras.

El dispositivo genera electricidad en corriente continua mientras se le inyecten hidrógeno y oxígeno. Normalmente el oxígeno se extrae de la atmósfera ambiente, pero el hidrógeno suele proceder de un



sistema llamado “transformador”, que produce el gas al descomponer un combustible fósil. Una de las ventajas de estas células es la gran diversidad de fuentes de combustible que pueden utilizar, pues de hecho puede emplearse cualquier producto en el que abunde el hidrógeno. Entre ellos figuran el amoníaco, los combustibles fósiles —gas natural, derivados del petróleo, propano líquido y carbón gasificado— y los combustibles renovables como el etanol, el metanol y la biomasa (cualquier tipo de materia vegetal). También puede producirse hidrógeno mediante plantas de energía solar, eólica o geotérmica. Incluso valen para ello los gases expulsados por máquinas excavadoras y depuradoras de agua. Es indudable que los agentes transformadores emiten contaminantes al descomponer el combustible para obtener hidrógeno, pero lo hacen en mucha menor medida que las tradicionales turbinas de combustión de gas, normalmente entre la décima y la milésima parte, dependiendo de cuál sea el contaminante y de cómo se regulen las emisiones de la turbina.

Dado que la pila de combustible produce corriente continua, se necesita un dispositivo inversor para convertirla en alterna que permita utilizarla con los aparatos habituales en viviendas y comercios. Tanto en el transformador como en el inversor se pierde energía, sobre todo en forma de calor. Aunque la propia pila alcance rendimientos superiores al 45 por ciento en la conversión de combustible a electricidad, las pérdidas señaladas pueden reducir el rendimiento global hasta un 40 por ciento, que es más o menos el de una moderna turbina de gas. Pero, al igual que sucede en la turbina, la recuperación del calor desprendido (para calentar el agua o el aire, por ejemplo) mejora apreciablemente la eficacia del dispositivo.



2. EN TIMES SQUARE, Nueva York, se construye este edificio, que albergará dos pilas de combustible de 200 kilowatt en el cuarto piso.

Un error muy extendido es que las pilas de combustible para aplicaciones fijas son mucho más potentes que las que se desarrollan para automoción. Lo cierto es que una pila de combustible de sólo 40 a 50 kilowatt puede cubrir las necesidades de electricidad de una vivienda grande, de cuatro o cinco dormitorios, o de un pequeño local comercial, como podría ser una lavandería. En cambio, para acelerar un coche normal con cuatro ocupantes se necesitan como mínimo 50 kilowatt. Estas mayores exigencias de las pilas para vehículos han llevado a imaginar que en el futuro quienes residan en zonas rurales puedan abastecerse de energía sin más que conectar la casa al coche.

La errónea creencia de que las pilas de combustible fijas siempre son mayores que las de automoción deriva probablemente de algunas unidades experimentales, de muy gran tamaño, ensayadas por compañías eléctricas en los últimos veinte años. Las más importantes fueron la pila de combustible de 4,5 megawatt instalada en 1982 por Consolidated Edison en Nueva York, la de 4,5 megawatt puesta en servicio por Tokyo Electric Power en 1984, otra de 11 megawatt explotada por la misma empresa de 1991 a 1997 y una planta de dos megawatt ensayada por Pacific Gas and Electric (California) en 1995. Las pruebas de EE.UU. plantearon problemas; la pila de California, por ejemplo, raramente generó más de un megawatt —la mitad de su capacidad teórica— y la de Nueva York nunca llegó a funcionar. Las experiencias japonesas fueron mucho más afortunadas; la unidad de 11 megawatt logró funcionar durante unas 23.000 horas.

Un paradigma nuevo

Estas y otras dificultades hicieron que los proyectistas y los defensores de las pilas de combustible fijas prefieran ahora estructuras más descentralizadas. Las viviendas individuales serán abastecidas por unidades pequeñas, no mayores de 50 kilowatt, mientras que habrá sistemas de cientos de kilowatt para alimentar edificios comerciales y grandes empresas. En medios industriales se estima que las ventas de pilas de combustible en los Estados Unidos para viviendas y pequeñas empresas podrían totalizar 50.000 millones de dólares (7,5 billones de pesetas) por año hacia 2030.

Estas cifras quizá reflejen un excesivo optimismo. Ni una sola vivienda unifamiliar se surte actualmente con pilas de combustible locales, pero hay tres compañías estadounidenses —Plug Power en Latham, N.Y., Avista Laboratories en Spokane, Wash., y Northwest Power Systems en Bend, Ore— que suministran electricidad a casas piloto. La primera pila de combustible lleva en servicio permanente poco más de un año (desde junio de 1998) en una casa del tipo de rancho cerca de Albany (*véase la figura 3*).

Se preparan asimismo sistemas más grandes para usos industriales y comerciales. Hay al menos una compañía que espera introducir de aquí a pocos años una pila de combustible de 500 kilowatt para aplicaciones fijas y varias otras tienen en desarrollo o en venta pilas de combustible con potencias nominales de 200 a 250 kilowatt. Así, por ejemplo, una pila de 250 kilowatt podría abastecer varias tiendas de una galería o un centro médico o profesional de poco tamaño.

En caso de que se prevean cargas mayores, se pueden enlazar varias unidades entre sí. En el nuevo edificio levantado en Times Square, 4, ciudad de Nueva York, se han instalado dos pilas de combustible de 200 kilowatt para dar agua caliente a todo el inmueble, iluminar su fachada y suministrar potencia de reserva. Se le ha lla-

COMPARACION DE PILAS DE COMBUSTIBLE

ELECTROLITO	Membrana de intercambio de proteínas	Acido fosfórico	Carbonato fundido	Cerámica de óxido sólido
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	80ºC	En torno a 200ºC	650ºC	800 a 1000ºC
PORTADOR DE CARGAS	Ion hidrógeno	Ion hidrógeno	Ion carbonato	Ion oxígeno
TRANSFORMADOR	Externo	Externo	Interno o externo	Interno o externo
COMPONENTES ESENCIALES	A base de carbono	A base de grafito	Acero inoxidable	Cerámica
CATALIZADOR	Platino	Platino	Níquel	Perovskitas (titanato de calcio)
RENDIMIENTO (%)	40 a 50	40 a 50	Mayor de 60	Mayor de 60
ESTADO DE DESARROLLO	Sistemas en demostración de hasta 50 kilowatt; se esperan unidades de 250 kilowatt en los próximos años	Sistemas comerciales en servicio, en su mayoría a 200 kilowatt; se ha probado un modelo de 11 megawatt	Sistemas en demostración de hasta 2 megawatt	Se han demostrado unidades de hasta 100 kilowatt

mado Green Building (edificio verde) porque los promotores, la Durst Organization, han pretendido que sirva para exponer las técnicas que favorecen más al ambiente.

En varias aplicaciones recientes se han elegido pilas de combustible por sus singulares características, que compensaban con creces su elevado coste. Por ejemplo, se instaló una unidad de 200 kilowatt en la comisaría de policía de Central Park, Nueva York. Con ello se evitó la onerosa excavación del parque para instalar líneas eléctricas subterráneas. En Nebraska, el First National Bank de Omaha anunció en el pasado febrero que iba a instalar cuatro pilas de combustible de 200 kilowatt en su Centro Técnico, donde se procesan las transacciones de tarjetas de crédito. Las pilas de combustible cuentan con el soporte de generadores auxiliares y del servicio eléctrico de la red local, habiéndoselas elegido en razón a la extremada fiabilidad que necesita esta aplicación, en la que las interrupciones más breves causan grandes daños económicos.

Cinco tipos de pila

Sin duda las pilas de combustible fijas pueden alcanzar tamaños y pesos muy superiores a los de sus homólogas móviles. Este mercado, pues, pese a ser hoy muy reducido, presenta una insólita variedad de técnicas tanto en fase de desarrollo como de explotación comercial. Existen cinco tipos principales de pilas, denominadas según el electrólito utilizado: de ácido fosfórico, de carbonato fundido, de óxido sólido, de membrana de intercambio de protones y las alcalinas.

La pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC, phosphoric-acid fuel cell) incorpora la técnica más consolidada de las cinco y es la única que se ofrece comercialmente en este momento para capacidades superiores a 100 kilowatt (todas las pilas de combustible hasta ahora vendidas para usos industriales son PAFC). En todo el mundo hay 12 organizaciones (siete en EE.UU.) que comercializan o desarrollan PAFC. Una de las mayores es ONSI, subsidiaria de United Technologies, que está introduciendo estas unidades desde finales de los ochenta. Hasta hoy ha instalado alrededor de 170 sistemas, que en su mayoría funcionan por gas natural. Varios de ellos han prestado servicio durante decenas de miles de horas.

Muchas de las compras de pilas de combustible ONSI en EE.UU. han sido subvencionadas mediante un programa dirigido por el Departamento de Defensa y el Departamento de Estado desde 1996. Los compradores reciben la que sea menor de estas dos cantidades: 1000 dólares (unas 150.000 pesetas) por kilowatt o un tercio del coste total. El programa ha distribuido ya más del equivalente a 2700 millones de pesetas entre los compradores e instaladores de más de 90 plantas de energía basadas en este tipo de pilas.

Algunas potentes compañías japonesas han vendido alrededor de 120 PAFC con capacidades que van de 50 a 500 kilowatt; algunas de ellas han totalizado más de 40.000 horas en servicio.

Tanto en EE.UU. como en Japón, la mayoría de las PAFC se han destinado a instalaciones generadoras que producen a la vez calor y energía eléctrica. En los últimos tiempos han aparecido otros cinco nichos de mercado: las excavaciones, la depuración de aguas, el proceso de alimentos, la generación ininterrumpida de energía y los enfoques ecológicos (como los ya mencionados en el Green Building de Nueva York). En las tres primeras aplicaciones, se inyecta en las células de combustible gas metano —que de otro modo sería desechado—; el uso de este producto gratuito compensa en parte el elevado coste de las pilas.

El coste de las PAFC lleva años estancado en unas 600.000 pesetas por kilowatt, casi el triple del que se estima necesario para que las pilas sean competitivas. Por ello ciertos observadores prefieren desterrar esta técnica como un callejón sin salida y casi todas las compañías creadas en los últimos tres o cuatro años para desarrollo de pilas de combustible están investigando otras soluciones,





3. CASA ALIMENTADA POR PILAS DE COMBUSTIBLE en Latham, N.Y., que obtiene su electricidad de una unidad del tamaño de una nevera contigua al garaje (*arriba a derecha e izquierda*). La pila de combustible es de las basadas en membrana de intercambio de protones y produce siete kilowatt, suficiente para las necesidades domésticas salvo en períodos de máxima demanda.

como las de carbonato fundido, óxido sólido y membrana de intercambio de protones.

Las pilas de carbonato fundido (MCFC, molten-carbonate fuel cells) y las de óxido sólido (SOFC, solid-oxide fuel cells) se asemejan en que han de funcionar a elevada temperatura, superior a 650 grados. Como su mismo nombre indica, la MCFC no puede operar mientras no se funda el electrólito y la SOFC necesita altas temperaturas para transformar internamente los combustibles y ionizar el hidrógeno, sin tener que recurrir a costosos catalizadores. Por otra parte, este calor se toma de la salida de las células, lo que la reduce un poco. Hay quienes conciben aplicaciones residenciales en las que se captaría el calor producido por las células para calentar las zonas habitadas y el agua (*véase la figura 1*).

La mayor actividad en MCFC dentro de Estados Unidos corresponde a la Energy Research Corporation (ERC) de Danbury, Conn., y a la M-C Power Corporation de Burr Ridge, Ill. ERC ha construido la planta de dos megawatt de Santa Clara, Calif., antes mencionada, que funcionó durante 3000 horas pero apenas llegó a entregar más de un megawatt. Recientemente ERC ha centrado su interés en las unidades de 250 kilowatt. Por su parte M-C Power ha demostrado una unidad de 250 kilowatt en San Diego, en 1997, aunque sólo consiguió producir 160 megawatt-hora antes de necesitar reparación. Una decena de empresas japonesas se dedica también a MCFC.

En cuanto a las SOFC, desarrollan esta técnica unas cuarenta compañías de todo el mundo. Una de las mayores se creó en 1998 cuando Siemens adquirió Westinghouse Power Generation, compañías ambas que habían trabajado en versiones de la SOFC. Entre otros importantes proyectistas de SOFC en EE.UU. figuran SOFCo, Ztek Corporation y McDermott.

Intercambio de protones

Si las pilas de ácido fosfórico, de carbonato fundido y de óxido sólido son de algún modo vestigios de un enfoque centralizado, la técnica de las membranas de intercambio de protones (MIP) representa con pujanza el descentralizado. Crece el entusiasmo por las pilas MIP, estimulado por recientes y notables reducciones en el coste de producción de los electrólitos y por la creación de catalizadores más resistentes a la degradación que causa el monóxido de carbono procedente de las transformaciones.

El componente esencial de una célula MIP es una delgada membrana semipermeable, que actúa como electrólito. Las partículas con carga positiva —los iones hidrógeno— pueden atravesarla, pero no así las negativas, como los electrones y los átomos. Hace algunos años se descubrió que el Gore-Tex,

ALAN C. LLOYD es presidente de la Junta de recursos atmosféricos de California. Cuando escribió el artículo era director ejecutivo del Centro de energía e ingeniería ambiental del Instituto de Investigaciones del Desierto en Nevada; previamente había sido científico jefe del Distrito de gestión de la calidad del aire en la Costa Sur de California. El autor desea agradecer al U.S. Fuel Cell Council y a Fuel Cells 2000 su ayuda en la preparación de este artículo.

material utilizado en ropas de abrigo, sirve para reforzar las membranas y mejorar notablemente sus características de funcionamiento.

Ventajas como éstas han despertado un torbellino de actividad sobre estos dispositivos. Hay actualmente unas 85 organizaciones, 45 de ellas en EE.UU., que investigan o desarrollan MIP. Un ejemplo es Ballard Generation Systems, que trabaja en un proyecto modular de MIP capaz de configurarse hasta los 250 kilowatt. La compañía espera iniciar la venta de estas unidades en 2001.

La división de sistemas de energía de General Electric se ha asociado con la Plug Power antes mencionada para comercializar, instalar y dar servicio a unidades MIP de todo el mundo, con capacidades de hasta 35 kilowatt. Esperan iniciar las pruebas de campo de prototipos a finales de este año e instalar las primeras unidades de tamaño doméstico a principios de 2001. Plug Power ha instalado y tiene en servicio una pila de combustible MIP en Latham, N.Y. (donde residen dos ingenieros de la empresa en días laborables).

También ha apostado por las MIP la H Power Corporation, que ofrece unidades pequeñas, desde 35 a 500 watt. Además de promocionar estas células para usos domésticos, H Power emprende aplicaciones sobre sistemas de reserva, telecomunicaciones y transporte. Por insólito que parezca, llega incluso a promover las pilas de combustible como recurso de emergencia frente a los apagones que, en opinión de algunos, puedan originar los fallos de programación al doblar el milenio. Otro proyecto de H Power está reequipando 65 señales de tráfico móviles con generadores de pilas de combustible para el Departamento de Transporte de Nueva Jersey.

Algunos otros proyectistas de MIP son Avista Laboratories, que trabaja en conjunción con la firma de ingeniería Black and Veatch; Matsushita Electric Industrial Company en Japón, dedicada a una pila de 1,5 a 3,0 kilowatt, y Sanyo, que ha desarrollado un sistema de pila MIP de un kilowatt a base de hidrógeno comprimido, semejante a un aparato eléctrico. Sanyo tiene asimismo en proyecto una unidad de dos kilowatt que funcione con transformador de gas natural o de metanol.

Las pilas de combustible alcalinas tienen una historia relativamente larga en usos exóticos como los viajes espaciales y son interesantes porque sus rendimientos llegan hasta el 70 por ciento. Pero hasta ahora diversas circunstancias, entre ellas su elevadísimo coste, las han mantenido fuera de las aplicaciones predominantes. Pese a todo, hay empresas que intentan producir unidades alcalinas que puedan competir en coste con otros tipos de pilas de combustible, cuando no con otras técnicas de generación.

Energía de primera calidad

Aparte de mantener las subvenciones, lo mejor que pueden esperar las pilas de combustible en el próximo futuro es hallar aplicaciones en las que la electricidad ya resulte cara o que puedan utilizar como combustible gases de desecho. A los precios actuales es probable que sea necesario combinar las subvenciones con circunstancias especialmente favorables. Por ejemplo, por iniciativa del gobierno de EE.UU., los compradores de plantas de pilas de combustible para uso residencial pueden aspirar a una ayuda federal. Anteriormente esta ayuda no se concedía más que a la compra de unidades de 100 o más kilowatt.

En un futuro menos inmediato, la preocupación por el cambio climático y la consecuente necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono podrían propiciar el uso de pilas de combustible en los países en desarrollo. En un trabajo presentado el año pasado, Robert H. Williams, del Centro de estudios ambientales y energía de Princeton, proponía que las pilas de combustible podrían contribuir a la electrificación de China, cuyos 1200 millones de habitantes presentan una de las tasas per cápita más bajas del mundo en cuanto a consumo de electricidad. Williams señaló que las enormes reservas de carbón de China podrían convertirse en fuente de gas rico en hidrógeno, muy adecuado para las pilas de combustible. El problema sería separar el dióxido de carbono que daría como desecho la gasificación del carbón, aislándolo de algún modo para que nunca pase al ambiente.

Todas estas cuestiones hacen que la introducción a gran escala de pilas de combustible en los países en desarrollo pudiera demorarse un decenio. Pero en el mundo más tecnificado cabe esperar próximos progresos en las técnicas de intercambio de protones, carbonato fundido y óxido sólido que abran nuevas aplicaciones a las pilas de combustible y amplíen las ya existentes. Al hacerlo se convertirán en heraldos de una economía basada en el hidrógeno, más limpia y respetuosa con el entorno. Nunca es demasiado pronto para encarar este reto.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FUEL CELLS AND THEIR APPLICATIONS. Karl Kordesch y Gunter Simader. VCH Publishers, 1996.

FULL DECARBONIZATION FOR FUEL CELL APPLICATIONS AND SEQUESTRATION OF THE SEPARATED CARBON DIOXIDE. R. H. Williams. Informe publicado por el Centro de Estudios Ambientales y Energía de la Universidad de Princeton, enero de 1996.

FOSSIL FUELS WITHOUT CARBON DIOXIDE EMISSIONS. E. A. Parson y D. W. Keith en *Science*, vol. 282, págs. 1053-1054; 6 de noviembre de 1998.

FUEL CELLS: A HANDBOOK. Cuarta edición. Departamento de la Energía de EE.UU., 1998.

Las baterías de los aparatos portátiles

Las baterías son caras y molestas. Podrían sustituirse por pilas de combustible miniatura en teléfonos móviles, ordenadores portátiles, videocámaras y otros productos de consumo

Christopher K. Dyer

Pese a los grandes progresos de la electrónica portátil, las baterías utilizadas no han cambiado mucho. Sus versiones más pequeñas siguen siendo la única solución para productos populares que consumen hasta 20 watt, desde juguetes a ordenadores portátiles. Pesan bastante, son caras y se agotan sin previo aviso, obligando a su reposición (si se tiene otra a mano) o a su recarga (que puede durar horas). ¿No queda otra alternativa?

Es curioso que la respuesta pueda depender de un invento del siglo XIX, las pilas de combustible. Teóricamente son tan cómodas de utilizar como las baterías, realizando una conversión silenciosa y limpia de la energía química de una sustancia en energía eléctrica. Pero su verdadera ventaja reside en la asombrosa capacidad que tienen de liberar energía eléctrica del átomo de hidrógeno. Una pila que funcione con metanol puede suministrar hasta veinte veces más energía que las baterías de níquel-cadmio tradicionales de volumen comparable, pero a menor precio y con mucho menos peso. Otra ventaja es que las pilas de combustible no requieren una recarga prolongada, sino que se restauran con rapidez sin más que añadir combustible.

El interés inicial se centró en las pilas para mover vehículos. Pero resulta difícil batir al motor de explosión, técnica desarrollada incesantemente durante muchos años. Parece que se abren más oportunidades en las aplicaciones menos voluminosas, donde las baterías son el principal competidor. Los recientes intentos de miniaturizar las pilas de combustible podrían cristalizar ciertamente en mejoras sustanciales, tales como teléfonos móviles que pudiesen funcionar continuamente durante meses enteros y ordenadores portátiles con más de cien horas de autonomía. Pero a medida que se achican las células de combustible los problemas de ingeniería se agudizan: no cabe duda de que la miniaturización exige un delicado equilibrio entre varios factores, como son la potencia, el tamaño, la comodidad de uso y el coste.

Hazañas de la electroquímica

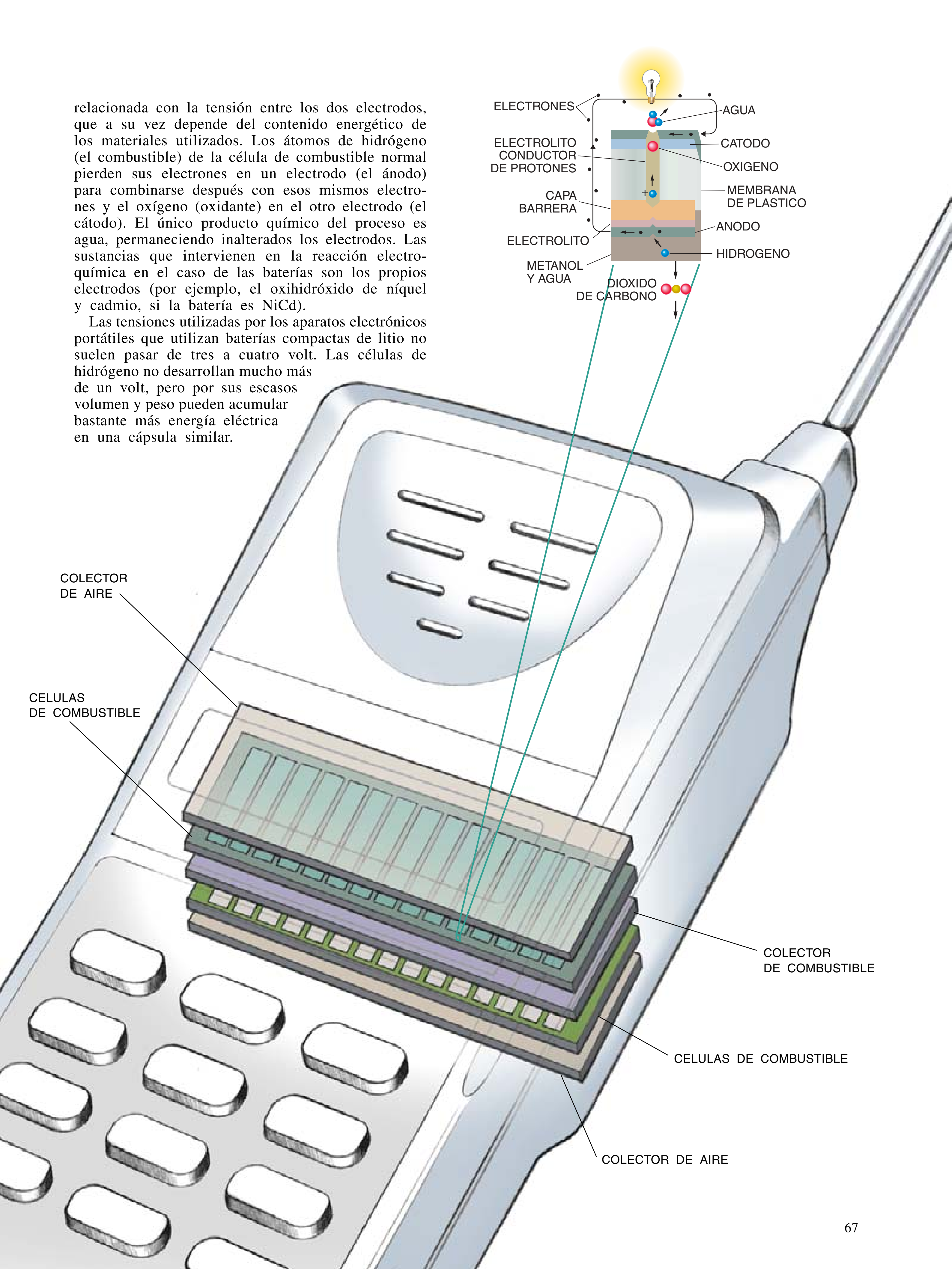
La verdad es que las pilas de combustible y las baterías se asemejan más de lo que se diferencian. Unas y otras se apoyan en la electroquímica para obtener electricidad a partir de la energía química almacenada en una sustancia. El proceso se inicia en la célula de combustible típica con el auxilio de un catalizador, que ayuda a liberar electrones de las moléculas de combustible, dejando un residuo de iones cargados positivamente. Los electrones viajan de un electrodo a otro a través de un circuito externo, mientras que los iones recién formados atraviesan un material llamado electrólito, que está intercalado entre los dos electrodos. Las dos corrientes paralelas, de electrones (negativa) y de iones (positiva), se compensan entre sí, equilibrando las cargas separadas. La extracción directa de electrones de los agentes químicos para generar energía eléctrica es un proceso silencioso, sencillo, relativamente frío y limpio; su rendimiento puede incluso triplicar al de un sistema alimentado por un pequeño motor de explosión.

La potencia que pueden generar una pila de combustible o una batería está directamente

1. UNA MICROPILA DE COMBUSTIBLE para teléfono móvil se aloja en el mismo espacio que corrientemente ocupa una batería recargable (*derecha*). La compacta fuente de energía contiene una hilera de células realizadas sobre dos placas delgadas. Las células individuales contienen varias capas (*arriba, derecha*) que se fabrican de forma parecida a las placas y los circuitos integrados electrónicos. Manhattan Scientifics proyecta construir un prototipo de esta pila a finales de este año.

relacionada con la tensión entre los dos electrodos, que a su vez depende del contenido energético de los materiales utilizados. Los átomos de hidrógeno (el combustible) de la célula de combustible normal pierden sus electrones en un electrodo (el ánodo) para combinarse después con esos mismos electrones y el oxígeno (oxidante) en el otro electrodo (el cátodo). El único producto químico del proceso es agua, permaneciendo inalterados los electrodos. Las sustancias que intervienen en la reacción electroquímica en el caso de las baterías son los propios electrodos (por ejemplo, el oxihidróxido de níquel y cadmio, si la batería es NiCd).

Las tensiones utilizadas por los aparatos electrónicos portátiles que utilizan baterías compactas de litio no suelen pasar de tres a cuatro volt. Las células de hidrógeno no desarrollan mucho más de un volt, pero por sus escasos volumen y peso pueden acumular bastante más energía eléctrica en una cápsula similar.



Batería de comparaciones

El factor que prima a la hora de comparar pilas de combustible con baterías no es precisamente el rendimiento básico, puesto que ambas son excelentes para extraer electricidad de sustancias químicas. Las pilas de combustible presentan la ventaja natural de que pueden utilizar combustibles hidrogenados, que tienen mucha energía. El hidrógeno puro en estado líquido tiene unas ochocientas veces más energía electroquímica que la misma cantidad en peso de níquel-cadmio (*véase la tabla)*. Pero el problema es que el hidrógeno líquido ha de conservarse a temperaturas criogénicas, por debajo de los —250 grados Celsius, lo que descarta su utilización para productos de consumo.

También dan resultados espectaculares los productos que contienen hidrógeno. En teoría pueden obtenerse unos 5000 watt-hora de un litro de metanol, lo bastante para mantener funcionando un ordenador portátil durante una semana sin interrupción. Un volumen comparable de batería de iones litio, el tipo recargable dotado de mayor densidad energética, no llega a dar la décima parte de aquella energía.

En la pila de combustible no ha de alojarse más que el propio combustible (por ejemplo, el metanol), dado que el oxígeno utilizado en la reacción electroquímica suele tomarse del aire circundante. En cambio las baterías tienen que almacenar ambos reactantes —dos voluminosos cuerpos sólidos— en el cátodo y en el ánodo, lo cual aumenta el coste, el tamaño y el peso de las unidades.

La comodidad de uso es otro aspecto a considerar. Se puede restaurar con rapidez una pila de combustible sin más que añadirle el combustible necesario, tal vez introduciendo una nueva ampolla de metanol o sustituyendo un cartucho de hidruro sólido. Las baterías, por su parte, requieren una recarga lenta, o hay que desecharlas del todo. En este sentido las pilas de combustible ofrecen la facilidad que tiene un motor de automóvil para el rápido reaprovisionamiento, lo que le permite funcionar casi sin interrupción.

Y por último vienen los factores económicos. Las pilas de combustible tenían otrora precios prohibitivos, por lo que su uso se ceñía a aplicaciones en las que eran insustituibles. Tal era el caso de los ligeros generadores de energía eléctrica y de producción de agua utilizados en las naves espaciales tripuladas. Pero una laboriosa tarea de ingeniería ha hecho descender notablemente los costes, lográndose, por ejemplo, una radical reducción de la cantidad de platino que necesitan los catalizadores. Los costes por unidad de energía de las baterías de gran densidad han aumentado entre tanto, debido a la subida de precios de los refinados materiales que utilizan. Todo confluye a que algún día las pilas de combustible puedan reemplazar a las baterías en muchas aplicaciones ordinarias.

Las cifras siguientes ayudan a comprender las razones. Sería excesivamente caro, por no decir impracticable, suministrar mediante baterías durante un cierto tiempo la potencia requerida por los aparatos que consuman hasta 100 watt. Una batería de níquel-cadmio de 20 watt pesa medio kilo y dura cerca de una hora, costando en torno a las 3000 pesetas. Si el uso ha de ser más prolongado, una batería de iones litio comparable puede proporcionar la misma potencia durante tres horas, pero su precio es al menos cuatro veces mayor. Por el contrario, una pila de combustible de similar capacidad que utilice metanol puede funcionar durante unas 30 horas, costando entre 300 y 800 pesetas los materiales básicos del dispositivo y el combustible.

Por supuesto que el precio de cualquier pila de combustible ha de incluir el coste de su fabricación, que es donde reside la dificultad. El diseño de una pila de combustible miniatura que pueda ser fabricada en serie de modo económico ha resultado ser una tarea muy laboriosa. Los retos planteados a la ingeniería son ingentes y requieren grandes dosis de innovación.

La inevitable complejidad

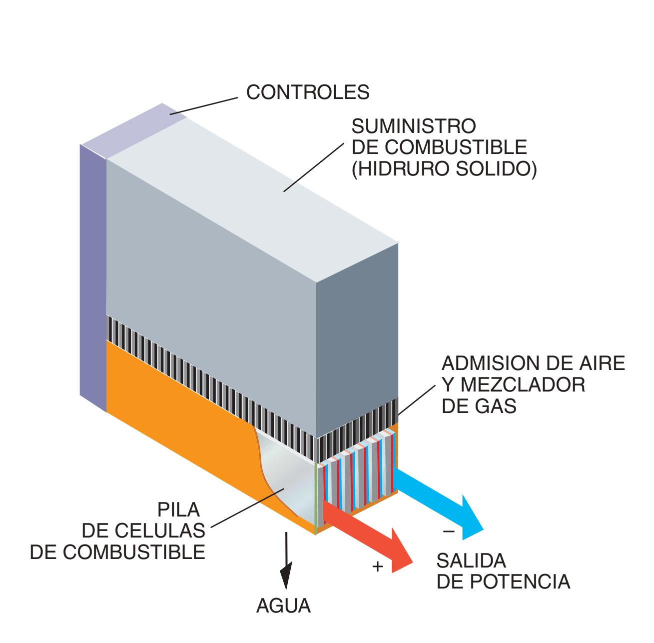
La pila de combustible básica es un dispositivo muy sencillo. No necesita más que un combustible hidrogenado, suministro de oxígeno, dos electrodos catalíticos y un electrólito. Pero a partir de ahí las cosas ya no son tan sencillas.

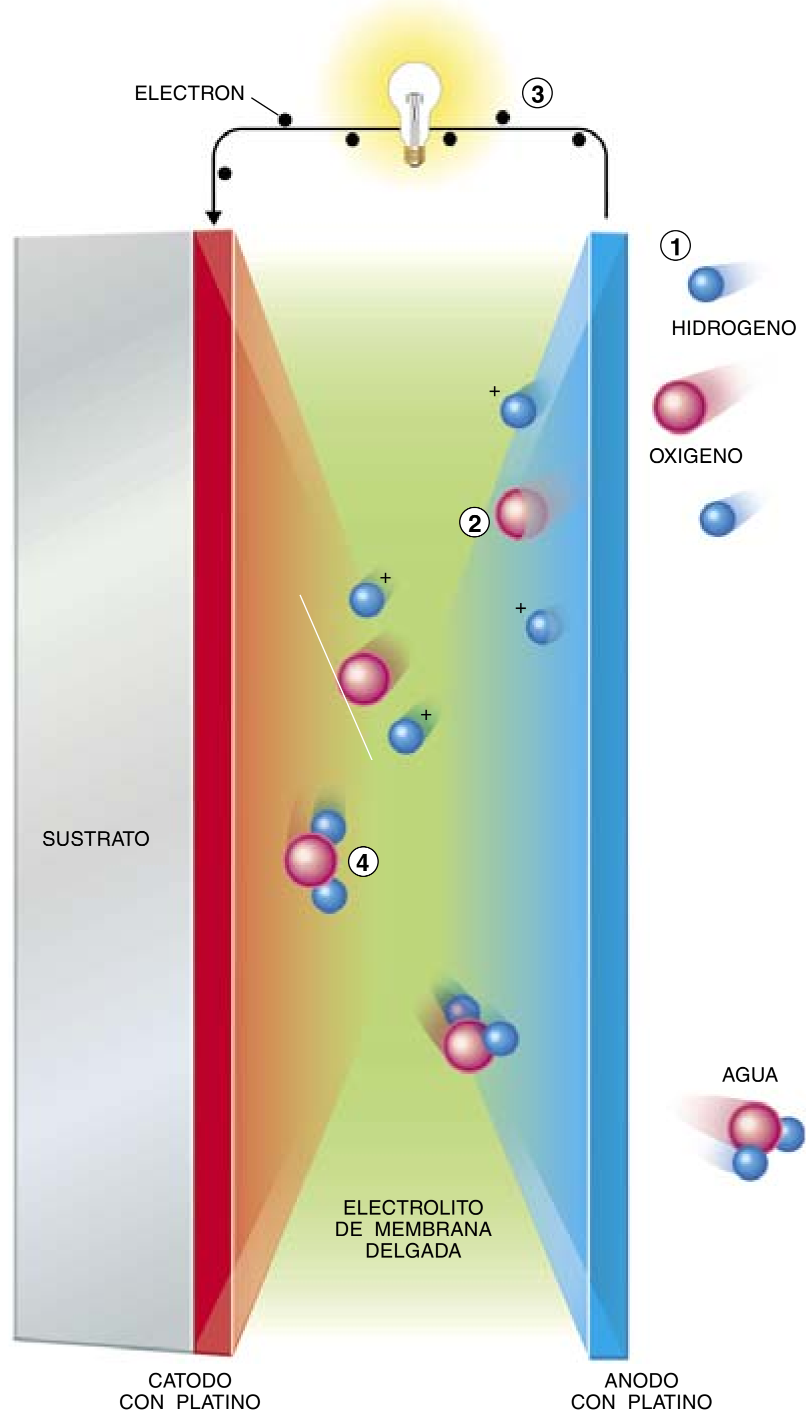
Como una célula aislada no genera suficiente potencia, hay que apilar o encadenar varias de ellas. Esta disposición complica las conducciones internas del dispositivo, especialmente en las subunidades necesarias para almacenar el combustible y el oxígeno. El conjunto de células puede que además se caliente en exceso, por lo que se necesitará un sistema de refrigeración, que es otra complicación más.

Estas cuestiones se agravan a medida que la pila de combustible se achica para alojarse en videocámaras y teléfonos móviles. La realidad es que los subsistemas pesan más y ocupan más volumen que la propia pila en los prototipos actuales. La miniaturización supone, pues, un reto para la ingeniería.

Una decisión crucial en la construcción de cualquier pila de este tipo es la elección del combustible, por las consecuencias que tendrá para el resto del sistema. El hidrógeno es la sustancia más fácil de oxidar en una de estas pilas, pero no puede manejarse en estado puro (gas o líquido criogénico) e incluso resulta peligroso para aplicaciones portátiles populares.

Una alternativa es el almacenamiento del hidrógeno en una serie de metales. El más conocido es el paladio, pero también hay muchas aleaciones baratas, como las de lantano y níquel o las de hierro y titanio. Es indispensable que el hidrógeno pueda extraerse con rapidez a la presión y temperatura ambientes, evitando así tener que recurrir a subsistemas adicionales. La ventaja de utilizar hidruros de metal es que pueden rellenarse; los hidruros metálicos absorben hidrógeno gaseoso durante unos 30 minutos a cero grados centígrados. La hidrólisis del agua en equipos domésticos podría utilizarse en el futuro para suministrar el hidrógeno necesario.





2. EL DISEÑO DE PELICULA DELGADA permite que esta pila miniatura genere energía extrayendo hidrógeno y oxígeno de la misma mezcla gaseosa, no de fuentes separadas como es tradicional. El dispositivo consiste en una pila de seis células (*arriba*), cada una de ellas con una membrana extremadamente delgada (menos de un micrometro). Esta capa porosa es el electrólito que separa el cátodo del ánodo (*derecha*). El hidrógeno pierde sus electrones en el ánodo (*1*) y se desplaza a través de la membrana hacia el cátodo. El oxígeno se difunde también a través del electrólito (*2*), mientras que los electrones liberados pasan por un circuito externo (*3*). En el cátodo se recombinan los iones hidrógeno, los electrones y el oxígeno (*4*) para formar agua.

También puede obtenerse hidrógeno con comodidad de hidruros químicos, como son los que contienen litio, aluminio, sodio o boro, más ligeros que sus homólogos metálicos. Pero resultan caros, no son reutilizables y además dejan un residuo cáustico.

Mucho más baratos son los hidruros orgánicos líquidos, como la decalina y el metilcicloexano. Pero para extraer el hidrógeno de ellos se necesitan un catalizador y temperaturas superiores a los 200 grados.

El metanol (alcohol metílico) ofrece mejores perspectivas. Tras muchos años de investigación se ha llegado a la conclusión de que el metanol es efectivamente la mejor opción para las pilas de combustible pequeñas. Contiene mucha energía y es relativamente barato (puede obtenerse del gas natural o de la biomasa casi al mismo precio que la gasolina), siendo cómodo de utilizar. Un teléfono móvil podría funcionar con ampollas de metanol baratas, que podrían adquirirse en droguerías y supermercados.

Pero surge un obstáculo. Para extraer el hidrógeno del metanol hay que someterlo a una compleja conversión química, llamada "transformación". De este proceso resultan dos subproductos: dióxido de carbono y una pequeña cantidad de monóxido de carbono. Afortunadamente no se producen óxidos de nitrógeno.

Pero el monóxido de carbono es perjudicial incluso en pequeñas cantidades, porque se adhiere al platino y degrada su acción catalizadora. Por consiguiente se requiere otra etapa más, la eliminación de este gas nocivo. Recientemente se han desarrollado transformadores pequeños que tienen una etapa primaria (para extraer el hidrógeno) y otra secundaria (para eliminar el monóxido

de carbono), pero es obvio que tales dispositivos encarecen y complican el sistema de la pila de combustible.

Hay catalizadores especiales que permiten que la pila consuma directamente metanol, sin transformador, a temperaturas inferiores a los 100 grados. Pero el proceso limita la potencia de la unidad. Por si fuera poco, la fuga del metanol hacia el cátodo disminuirá todavía más la potencia y el rendimiento. Para combatir esta degradación puede utilizarse metanol diluido como combustible, pero así se anula la ventaja inicial que tenía la utilización de tan poderoso alcohol. Hay especialistas que opinan, en suma, que la aceptación comercial del metanol dependerá en última instancia de la invención de una membrana que sea impermeable a él.

Más delgado todavía

Varias empresas, entre ellas Ballard Power Systems de Burnaby, B.C., y H Power de Belleville, N.J., han aplicado a los sistemas pequeños (de entre 20 y 100 watt) las técnicas de las pilas de combustible ordinarias. Aunque los prototipos no sean más que las primeras tentativas de aplicación a los aparatos portátiles, son ya comparables con las baterías de iones litio.

Para sustituir las baterías se necesitan pilas de combustible miniatura, hechas con componentes más delgados y con subsistemas más pequeños y más ligeros. Es indudable que ya se están construyendo tales sistemas en distintos centros de investigación. Gran parte del trabajo se mantiene en secreto, pero se han filtrado informaciones que revelan grandes diferencias de enfoque.

El Instituto Fraunhofer para sistemas de energía solar de Friburgo, Alemania, y Siemens PC Systeme han construido conjuntamente un prototipo de pila de combustible para ordenadores portátiles. Se compone de cinco placas muy delgadas, cada una de las cuales tiene a su vez cinco células de combustible en serie. Esta agrupación de 25 células puede generar 20 watt utilizando un hidruro de metal sólido como fuente de combustible. El dispositivo se comporta ya un poco mejor que las baterías de iones litio, y se encuentra actualmente en período de perfeccionamiento.

Un enfoque radicalmente distinto es el de Robert Hockaday de Manhattan Scientifics, en Nueva York, quien desarrolla una micropila de combustible para ordenador portátil susceptible de fabricarse en serie mediante técnicas tomadas de la industria electrónica (*véase la figura 1*). Para ello se bombardea con partículas nucleares una delgada película de plástico (de sólo 25 micrometros de espesor), que después se ataca químicamente. Se forman así finos poros (las células de la pila) en los que se añade un electrólito polímero. A continuación, recurriendo a técnicas propias de la microelectrónica como la deposición en vacío, se disponen en capas y se graban en la estructura plástica una barrera preferiblemente permeable (para bloquear la fuga de metanol), las dos placas electrodo, un catalizador y una rejilla conductora que conecte las células individuales.

Estas pilas pueden alimentarse directamente con metanol diluido. La potencia que entregan actualmente no es gran cosa, pero podrían agruparse en cápsulas poco voluminosas y mejorar así el rendimiento de las baterías de iones litio. Su arranque es, por el contrario, lento, requiriendo el auxilio de una batería, que además ayudaría a absorber bruscos aumentos de la demanda de potencia. Si se lograse mantener bajo el coste del proceso de fabricación multietapa, este nuevo

ENERGIA POTENCIAL DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

	ENERGIA ELECTROQUIMICA ALMACENADA (en watt-hora)	
	En masa (por kilogramo)	En volumen (por litro)
PILAS DE COMBUSTIBLE		
Decalina ($C_{10}H_{18}$)	2400	2100
Hidrógeno líquido	33.000	2500
Borohidruro de litio ($LiBH_4$ y $4H_2O$)	2800	2500
Hidruro de metal sólido ($LaNi_5H_6$)	370	3300
Metanol	6200	4900
Hidrógeno en nanofibras de grafito	~16.000	~32.000
BATERIAS RECARGABLES		
Acumulador de plomo	30	80
Níquel-cadmio	40	130
Hidruro de metal-níquel	60	200
Iones litio	130	300

Notas: Para combustibles de hidrógeno e hidrocarburos, se supone una oxidación completa. Los valores son teóricos (máximo termodinámico), salvo para hidruros de metal y nanofibras de grafito. Las cifras dadas para estas dos sustancias se refieren al hidrógeno extraíble. Las nanofibras de grafito son un nuevo descubrimiento en curso de investigación; se supone una densidad de dos gramos por centímetro cúbico. En cuanto a las baterías, se dan los valores reales de la energía electroquímica disponible.

CHRISTOPHER K. DYER, después de trabajar en los Bell Laboratories de AT&T y el Bell Communications Research, ha pasado a Motorola. Hasta 1998 presidió una empresa conjunta de Bellcore y Motorola que desarrolló su invento de la célula de película delgada para aplicación en dispositivos electrónicos portátiles. Es graduado por la Universidad de Cambridge y edita en EE.UU. la revista internacional *Journal of Power Sources*.

enfoque podría terminar por conseguir unos elementos económicos.

El gobierno estadounidense se ha interesado también por la inyección directa de metanol, como demuestran los programas emprendidos en las universidades y en los laboratorios de la administración. El Jet Propulsion Laboratory de Pasadena y la Universidad de California del Sur han desarrollado conjuntamente una pila de combustible que incorpora un electrólito polímero y un catalizador especial en el ánodo; se trata de una aleación de platino y rutenio, que resulta más barata que el platino puro. Prototipos de 10, 40, 150 y más watt han estado funcionando continuamente durante ocho días a 90 grados.

Por desgracia estas células no toleran más que una dilución máxima del 2 por ciento de metanol en agua. Pero una disposición ingeniosa consigue devolver el agua que se produce en el cátodo a una cámara muy pequeña próxima al ánodo, donde se la utiliza para diluir el metanol puro, aumentando así el rendimiento de la pila al tiempo que se reduce al mínimo su tamaño. El nivel de densidad de potencia actual del sistema entero es de unos respetables 30 watt por litro, habiéndose establecido la meta de multiplicar esa cifra al menos por tres a finales de año (1999).

Personalmente me he interesado por una célula de combustible de película delgada (*véase la figura 2*), que genera energía a partir de una mezcla gaseosa de hidrógeno y oxígeno, diferente de los proyectos habituales en que éstos requieren suministros separados de los gases. La simplicidad de la operación debería dar lugar a un sistema más económico y compacto.

El hidrógeno se oxida (pierde electrones) mucho más aprisa en el electrodo de platino descubierto que en el otro electrodo de platino, ya que el primero está en contacto directo con la mezcla gaseosa. Habrá así un aflujo aplastante de iones hidrógeno al electrodo descubierto (el ánodo), que se difundirán luego velozmente a través de la membrana hacia el electrodo más lento (el cátodo), situado inmediatamente sobre el sustrato. Allí, con el concurso de los electrones recibidos del exterior, los iones hidrógeno se combinan con el oxígeno difundido a través de la membrana porosa. Esta reacción electroquímica, llamada reducción, produce agua y crea un potencial positivo próximo a un volt. El mecanismo se apoya en la proximidad de los dos electrodos, pues de otro modo los iones hidrógeno no podrían llegar desde el ánodo al cátodo.

Una sola célula con este tipo de película delgada (fundamentalmente un emparedado de tres capas, platino, electrólito y platino) de 16 centímetros cuadrados de superficie podría generar hasta 0,85 watt de potencia en teoría, de modo que una pila de seis células, que no tendría más que un centímetro de profundidad total, podría entregar hasta cinco watt (tres volt con una corriente de 1,7 ampere). Este diseño podría conseguir unas células extremadamente compactas, que suministrasen hasta 1000 watt-hora por litro usando un hidruro sólido y 1400 watt-hora por kilogramo a partir de metanol, rendimiento bastante superior al de las baterías de iones litio.

Todas estas pilas miniatura todavía están en las fases más tempranas de su desarrollo. Es importante señalar que, pese a haber construido prototipos iniciales, nadie ha conseguido presentar hasta el momento un dispositivo compacto que pueda producirse en serie a un coste claramente inferior al de las baterías recargables tomadas como referencia.

¿Nuevas fuentes de combustible?

Si se descubriera una fuente mejor de hidrógeno que las conocidas, se aceleraría enormemente la comercialización de pilas de combustible pequeñas. El metanol contiene mucha energía, pero su empleo se ve complicado por problemas de ingeniería; los hidruros de metal constituyen un medio adecuado, pero no espectacular.

Recientemente Terry Baker ha dado a conocer una forma especial de carbono a la que ha denominado nanofibras de grafito, que ofrecería una capacidad casi increíble. Según sus palabras, un gramo del material podría suministrar 10 litros de hidrógeno. Una densidad de energía tan inusitada (equivalente a unos 16.000 watt-hora por kilogramo) haría palidecer a otras sustancias comparables. Bastaría medio litro de esta increíble sustancia para alimentar continuamente un ordenador portátil durante más de un mes, al menos en teoría.

Habrá que contrastar con más detalle esta experiencia, pero el uso de materiales nuevos parecidos indica las enormes posibilidades que tienen las pilas de combustible como fuente de energía portátil. Es curioso recordar ahora que el descubrimiento de que ciertos compuestos de carbono absorbían cantidades apreciables de litio supuso un importante avance en la técnica de las baterías ordinarias.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FUEL CELLS: THEIR ELECTROCHEMISTRY. John O'M. Bockris y Supramaniam Srinivasan. McGraw-Hill, 1969.

FUEL CELL HANDBOOK. A. J. Appleby y F. R. Foulkes. Van Nostrand Reinhold, 1989.

A NOVEL THIN-FILM ELECTROCHEMICAL DEVICE FOR ENERGY CONVERSION. C. K. Dyer en *Nature*, vol. 343, págs. 547-548; 8 de febrero de 1990.

Formación de estrellas en galaxias espirales

Las galaxias constituyen los laboratorios astrofísicos donde someter a prueba la influencia de las condiciones del medio interestelar en la generación de estrellas

Jordi Cepa Nogué

Desde que el ser humano dirigió por primera vez su mirada al cielo, se dio cuenta de que en el firmamento nocturno no sólo titilaban estrellas, sino que había estructuras nebulosas. A simple vista podía admirar la "nebulosa" de Orión, en la daga de Orión, y la "nebulosa" de Andrómeda, en la constelación del mismo nombre.

El telescopio refractor, inventado en 1608, y el telescopio reflector, ideado en 1672, con sus mejoras sucesivas, permitieron multiplicar el elenco de objetos de naturaleza nebulosa. En 1781 Charles Messier había catalogado más de 100 objetos difusos. Veinte años después, William Herschel contaba más de 2500.

A mediados del siglo XVIII, Immanuel Kant sugirió que las "nebulosas" podían ser sistemas de estrellas, igual que nuestra Vía Láctea. Se rechazó la propuesta. No se podía entonces determinar las distancias y tamaños de estos objetos. Y resultaba impensable que el universo midiera las dimensiones que hoy manejamos. Pero desde hace tiempo se sabe que la hipótesis de Kant es inexacta. Las nebulosas no son todas galaxias como la nuestra. La "nebulosa" de Andrómeda sí es una galaxia, en tanto que la nebulosa de Orión es una nube de gas perteneciente a nuestra galaxia.

Para determinar las distancias hubo que esperar a los trabajos de Harlow Shapley, quien estimó las dimensiones de nuestra galaxia apoyándose en las estrellas Cefeidas. Estas estrellas variables presentan una relación definida entre su período de oscilación y su luminosidad. Para establecer el período de oscilación se atiende a la variación de su brillo en función del tiempo. La luminosidad guarda relación con la distancia.

Shapley dejó sentado que la Vía Láctea era el plano de un disco delgado, constituido por unos cien mil millones de estrellas y de unos cien mil años luz de diámetro. Su descubrimiento puso de nuevo sobre la mesa la naturaleza de las "nebulosas espirales", mencionadas ya a mediados del siglo XIX. Debate que sentenció Edwin Hubble en 1923 con su hallazgo de estrellas Cefeidas en la nebulosa de Andrómeda. Hubble explicó que las "nebulosas espirales" eran galaxias de dimensiones similares a la Vía Láctea, aunque situadas a distancias de millones, decenas de millones o más años luz.

Las galaxias se componen de estrellas de masas y edades diversas, de polvo y de gas, hidrógeno sobre todo. Las proporciones de los constituyentes, así como sus propiedades físicas y químicas, varían en función de la morfología de la galaxia.

Hay galaxias elípticas, lenticulares, espirales e irregulares. Las galaxias elípticas, sistemas pobres en gas, constan fundamentalmente de estrellas, agrupadas en figura elipsoidal. Su proyección sobre la línea de visión del observador dibuja una elipse. Las galaxias irregulares, las más ricas en gas y polvo, no llegan a perfilar ninguna figura geométrica definida.

En las galaxias espirales predominan gas y estrellas. Constan de un bulbo central, parecido en sus propiedades a una galaxia elíptica, y de un disco que lo atraviesa, donde se concentran el gas y el polvo. El principal contingente de estrellas aparece en el disco.

A menudo, una estructura a modo de barra atraviesa el bulbo y origina una galaxia "espiral barrada". El disco galáctico, cuyo diámetro multiplica varias decenas de veces su espesor, aloja los "brazos", estructuras espirales que parten del bulbo o de los extremos de la barra. Los brazos se despliegan hasta llegar al extremo del disco.

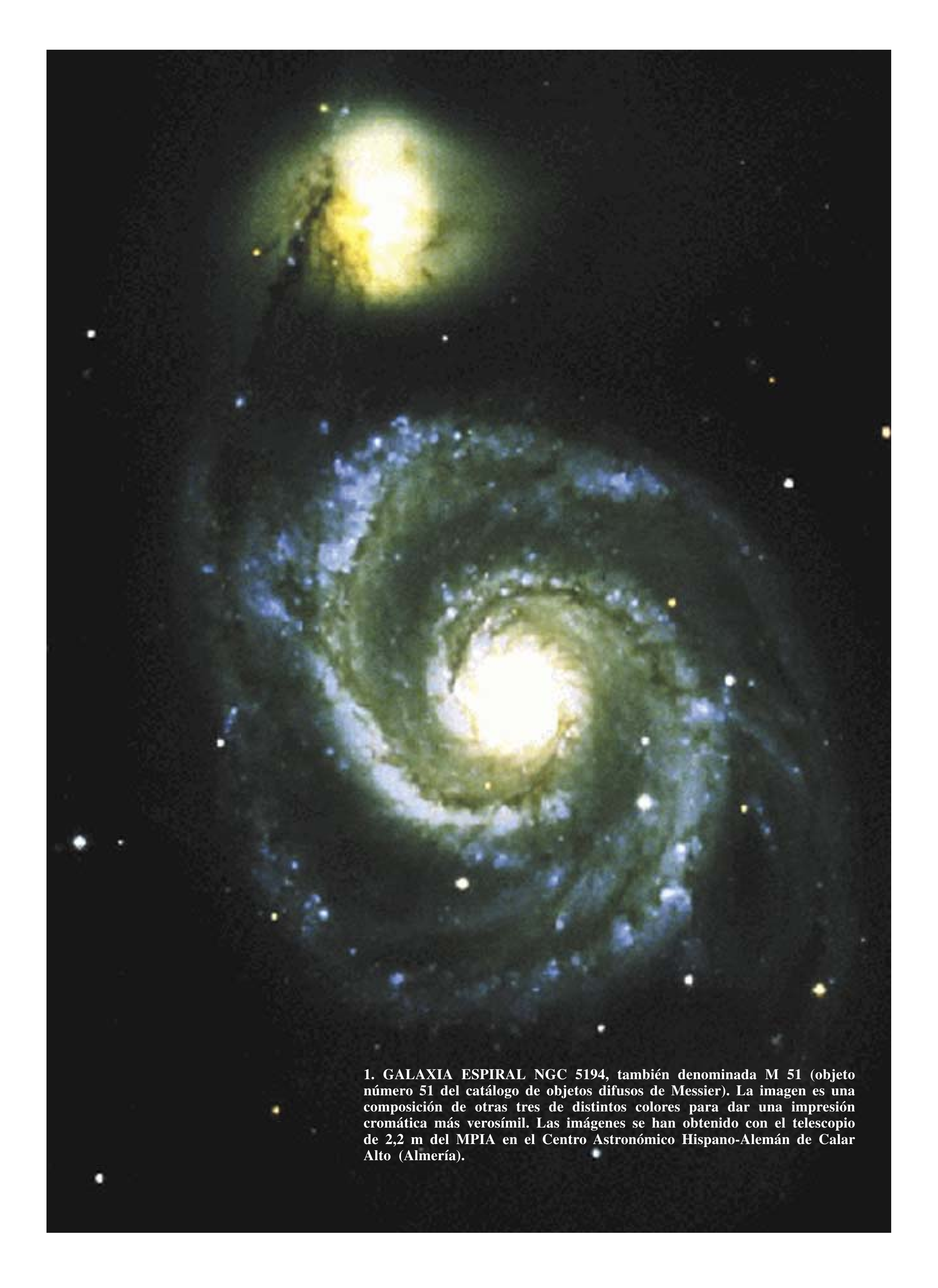
Por último, las galaxias lenticulares se hallan a medio camino entre las elípticas y las espirales. Presentan bulbo y disco, si bien éste es pobre en gas. Las galaxias lenticulares tienen menos masa que las espirales y carecen de brazos.

Propio de las galaxias dotadas de disco (espirales y lenticulares) es que el material constituyente del mismo no rota como un sólido rígido, sino que se mueve en rotación diferencial. Las partes internas, cercanas al bulbo, rotan más rápido que las partes externas, según descubriera Vesto Slipher en 1917.

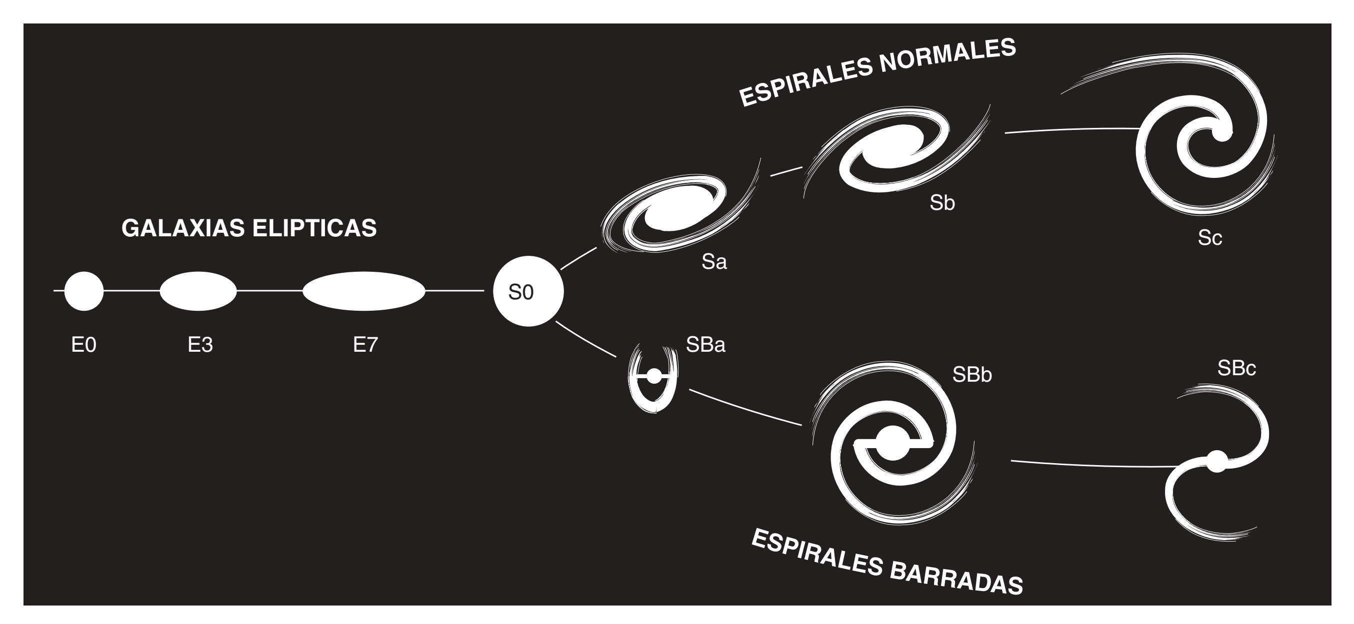
Las galaxias amontonan cantidades diferentes de gas y en condiciones fisicoquímicas dispares. No es de extrañar, pues, que unos mecanismos de formación estelar a partir de esa materia prima dominen más en unos tipos que en otros.

Antes de abordar los mecanismos, conviene familiarizarse con el proceso general de la manufactura estelar. De algunas fases no podemos dar una descripción cuantitativa exacta, lo que no obsta para ofrecer una explicación cualitativa.

JORDI CEPA, experto en formación estelar, enseña astrofísica en la Universidad de La Laguna, labor que comparte con la de investigador del Instituto de Astrofísica de Canarias.



1. GALAXIA ESPIRAL NGC 5194, también denominada M 51 (objeto número 51 del catálogo de objetos difusos de Messier). La imagen es una composición de otras tres de distintos colores para dar una impresión cromática más verosímil. Las imágenes se han obtenido con el telescopio de 2,2 m del MPIA en el Centro Astronómico Hispano-Alemán de Calar Alto (Almería).



2. TIPOS MORFOLOGICOS. El diagrama muestra la clasificación morfológica presentada por Hubble en 1936. Las galaxias elípticas se indican por la letra *E* seguida de un número que representa el grado de achatamiento; le siguen las galaxias lenticulares *S0*, con un disco, aunque sin brazos espirales; a continuación, las espirales barradas *SB* y no barradas *S*, con una letra añadida que indica el tamaño del bulbo y el grado de apertura de los brazos espirales (*a*: mayor bulbo, brazos más apretados; *c*: bulbo menor, brazos más separados).

Se sabe que el gas a partir del cual se forman estrellas es, en buena medida, hidrógeno molecular. El gas aparece distribuido en nubes dotadas de estructura jerarquizada. Los elementos fundamentales, de pocos años luz y escasas masas solares, se agrupan en superestructuras de tres mil años luz y varios cientos de millones de masas solares.

El gas se encuentra a una decena de grados por encima del cero absoluto y una densidad de entre cien y mil moléculas por centímetro cúbico. En la parte central, temperatura y densidad multiplican hasta mil veces ese valor.

Contra la estabilidad de estas nubes moleculares se oponen diversos factores, que pueden terminar por fragmentarlas en partes de distintas masas, algunas de las cuales originarán, quizás, estrellas por desplome gravitatorio. Las estrellas emergidas barrerán el gas remanente, suspendiendo la formación de otras nuevas estrellas en su zona. Pero también pueden interactuar con los restantes fragmentos de gas, catalizando la formación de estrellas en ellos.

Habrá, pues, que definir las magnitudes que describen la formación estelar en una región determinada. Esos parámetros son: la razón de formación estelar, la eficiencia de formación estelar y la función inicial de masas.

La razón de formación estelar proporciona la masa de estrellas engendradas por unidad de tiempo. La eficiencia representa la fracción en masa de nube molecular que se ha contraído para crear estrellas. Por función inicial de masas se entiende la función de distribución de cuántas estrellas de cada intervalo de masas o tipo espectral se han constituido. Estas tres magnitudes, independientes entre sí, sirven para parametrizar la formación estelar de una zona.

Consideremos dos nubes moleculares: una de diez mil masas solares y otra de un millón. Si todo el gas de la primera nube se contrae ("colapsa") y emergen estrellas, mientras que en la segunda sólo se comporta así la centésima parte del gas, la razón de formación estelar será la misma en las dos regiones, pero el rendimiento mostrado por la primera alcanza el cien por cien y el de la segunda se queda en el uno por ciento.

La función inicial de masas podría no ser la misma en las dos regiones, aunque ambas engendren igual masa de estrellas. Una región puede producir una fracción mayor de estrellas de gran masa sin engendrar apenas estrellas de poca masa; la otra región, por contra, podría manufacturar numerosas estrellas menos masivas y ninguna de gran masa.

Acostumbra ocurrir que la fracción de estrellas de baja masa supera de lejos la cuantía de estrellas de masa mayor. Ahora bien, las estrellas de masa mayor despiden más luz en la parte visible del espectro electromagnético. Por eso se dice que las estrellas de masa escasa indican la masa de una región, en tanto que las de gran masa manifiestan la luz visible que emite dicha zona.

Una galaxia espiral puede presentar desde un solo brazo hasta muchos y cortos (estructuras "multibrazo"), pasando por dos simétricos, quizá sea éste el cuadro habitual en muchas fotografías. Los brazos no emiten todos el mismo brillo ni alcanzan la misma longitud. En las galaxias barradas, el número de brazos suele ser par.

En los brazos espirales se concentra en buena parte, si no toda, la formación estelar que se desarrolla en el disco. De ahí que el brillo de los brazos resalte por encima de la luminosidad del disco y muestren la conocida estructura espiral de las imágenes ópticas.

Todas las galaxias con disco y gas en su interior desarrollan brazos espirales. No así las lenticulares. Aunque portadoras de disco, carecen de una cantidad sustancial de gas y no presentan estructura espiral. De ello se infiere que la estructura espiral constituye siempre un fenómeno espontáneo. Y estable. Si no lo fuera, sólo una fracción de las galaxias con disco y gas mostrarían brazos espirales. Por último, se trata de un fenómeno que suponemos vinculado a la formación estelar.

La estructura espiral despertó la

curiosidad de los astrónomos antes incluso de conocerse la naturaleza extragaláctica de las nebulosas espirales. La historia recoge varias teorías que se han ido sucediendo para dar cuenta de la forma espiral. Cualquier modelo explicativo que se proponga ha de justificar las cuatro propiedades que caracterizan la estructura espiral: ha de ser un fenómeno estable, espontáneo, relacionado con la formación estelar y perdurable tras la rotación diferencial.

Las primeras teorías sobre formación de brazos espirales convertían a éstos en estructuras ligadas al disco, quizás eyecciones de materia del bulbo. Pero ese planteamiento desembocaba en el dilema del arrollamiento. En efecto, si los brazos se hallaran trabados al disco, al moverse éste en rotación diferencial y girar sus partes internas más deprisa, los brazos se arrollarían sobre sí mismos en un intervalo temporal harto breve, corto para los estándares astronómicos. Considerando una curva de rotación típica, en un tiempo del orden del diez por ciento de la edad del universo, las partes internas del disco habrán dado unas quince vueltas más que las partes externas.

Para evitar la aporía del arrollamiento, los astrónomos tomaron dos caminos, a saber, el que consiste en desacoplar de la cinemática del disco los brazos espirales y el que se sirve de la propia cinemática, la rotación diferencial, para engendrar brazos espirales. El primer procedimiento constituye la teoría de ondas de densidad; el segundo, la teoría de autopropagación aleatoria de la formación estelar. Ambas teorías permiten generar estructuras permanentes y relacionadas con la creación de estrellas, amén de cumplir los requisitos necesarios para explicar la estructura espiral.

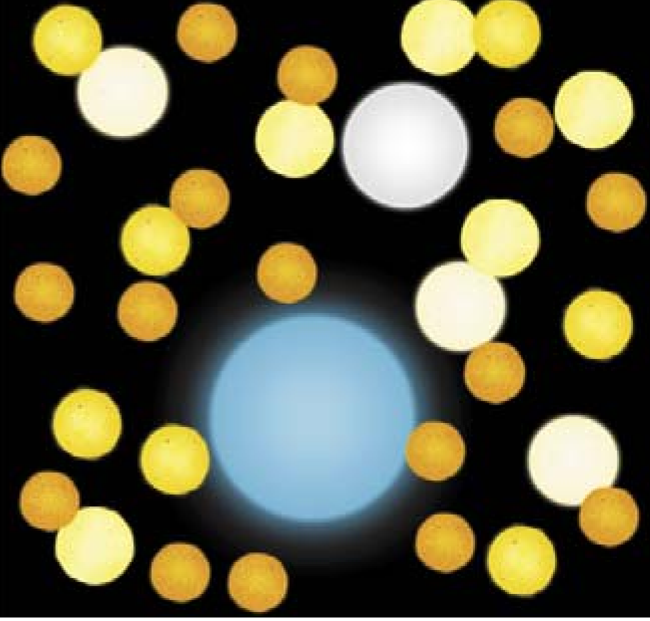
La teoría de ondas de densidad fue propuesta en 1941 por Bertil Lindblad. Más de veinte años dedicó a su desarrollo, apoyado en la teoría de órbitas. Pero el modelo no ganó atractivo hasta la segunda mitad de los sesenta, cuando Chia Chiao Lin, Frank Shu y Chi Yuan abordaron el problema sirviéndose del formalismo matemático aplicado a las agrupaciones de partículas. Emplearon las ecuaciones de la dinámica estelar, establecidas por Chandrasekhar, para estudiar el comportamiento de un disco, infinitamente delgado, compuesto de estrellas. Recurrieron a las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes de la mecánica de fluidos para describir el comportamiento de un disco gaseoso, también de espesor despreciable. Finalmente, la ecuación de Poisson les permitía relacionar el potencial gravitatorio con la distribución total de masa, es decir, de las estrellas y del gas.

Para resolver el conjunto de ecuaciones resultante, muy complejo, introdujeron pequeñas perturbaciones del potencial y, por tanto, de la densidad y del campo de velocidades. Obtuvieron como solución del sistema unas ondas de mayor densidad en espiral, que se propagaban a través del disco con una velocidad angular constante, llamada "velocidad del patrón de ondas".

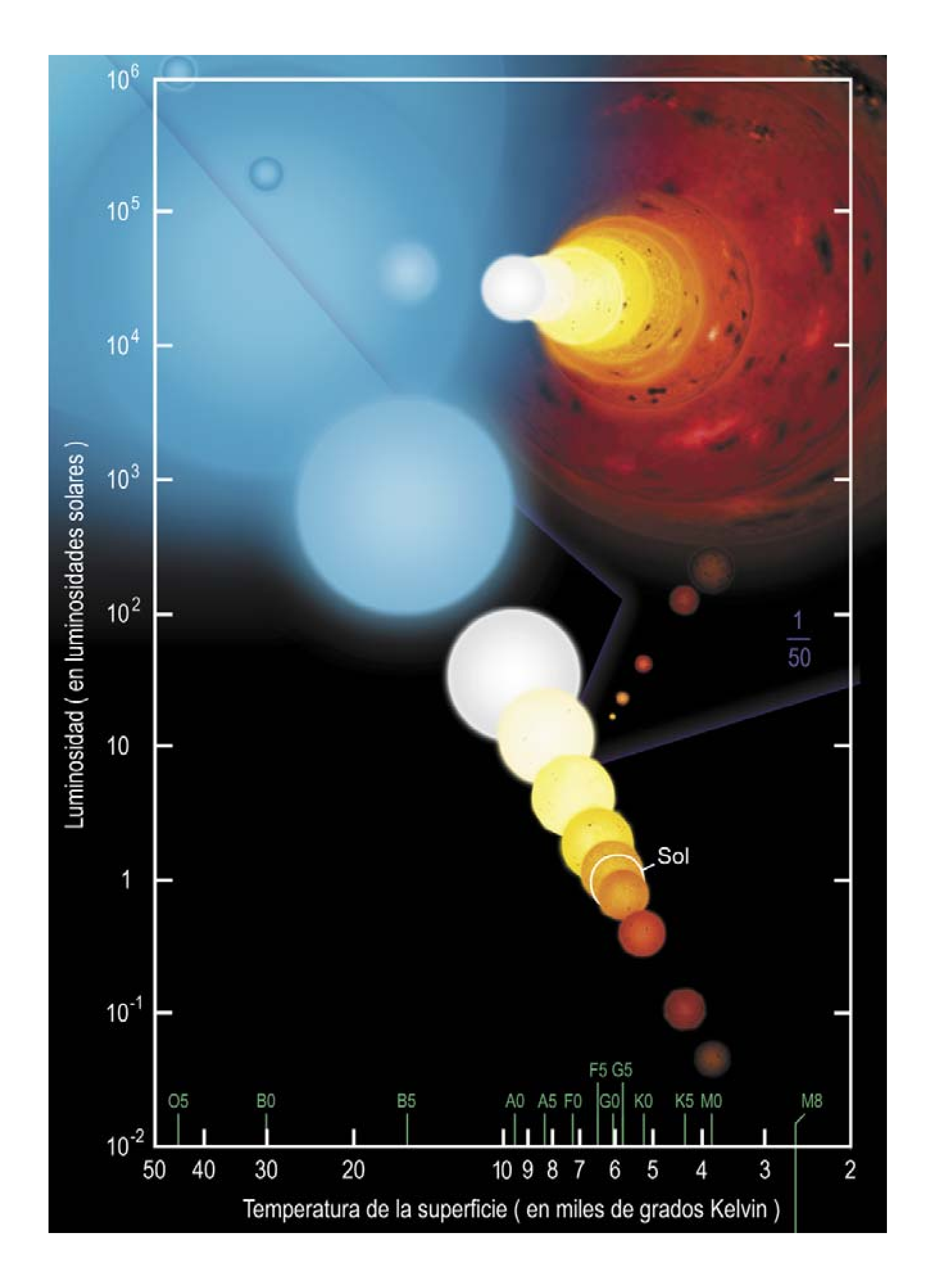
Al imponer que la distribución total de masa de las estrellas y del gas obedeciera la ecuación de Poisson podían obtener soluciones cuasiestacionarias, a condición de que el dominio de existencia de las ondas estuviera limitado por dos condiciones de resonancia, a saber, la resonancia externa e interna de Lindblad. Las ondas de densidad no se podían propagar a radios menores que la resonancia interna ni mayores que la externa. En la práctica, dichos límites se ajustan bastante al tamaño de los discos de las galaxias y los brazos espirales los ocupan en casi toda su extensión.

Podríamos asimilar las ondas de densidad a las ondas de compresión.





3. DIFERENTES FUNCIONES INICIALES DE MASA. Cuando una nube de gas se contrae ("colapsa") para formar estrellas, las masas de éstas pueden distribuirse en razón de las condiciones en que se encuentren. La función de distribución se denomina función inicial de masas. En la figura de la izquierda se ha representado la distribución en el caso de una función inicial de masas típica de una nube de gas de 50 masas solares en estrellas; en la de la derecha se ha representado una función inicial de masas sesgada en el sentido de inhibir la formación de estrellas menos masivas y favorecer la producción de estrellas más masivas. Puesto que en ambos casos se crean 50 masas solares, la razón de formación estelar es la misma, aunque difiera la distribución espectral de luminosidad del grupo de estrellas.



Luminosidad (en luminosidades solares)
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
10^{-1}
10^{-2}
1/50
Sol
O5
B0
B5
A0
A5
F0
F5
G0
G5
K0
K5
M0
M8
50
40
30
20
10
9
8
7
6
5
4
3
2
Temperatura de la superficie (en miles de grados Kelvin)

Ejemplo de las segundas son las del sonido en el aire, que adoptan una configuración espiral debido a las condiciones de contorno, esto es, un disco muy delgado, de tamaño finito, en rotación. Ahora bien, ya sabemos que el material del disco se mueve en rotación diferencial, con mayor velocidad angular en la región interna y menor en la externa. A su vez, la onda se mueve a velocidad angular constante, en el mismo sentido que el material del disco. En la zona central del disco habrá, pues, un radio de corrotación, para el cual el material del disco se mueve a la misma velocidad que la onda.

En la zona situada entre la resonancia interna de Lindblad y el radio de corrotación, el material del disco, gas y estrellas, alcanza a la onda, altera su velocidad, se comprime y abandona la onda adquiriendo la velocidad y densidad originales. Más allá del radio de corrotación ocurre el mismo proceso, pero es la onda de densidad espiral la que alcanza al material del disco.

Aunque la onda de densidad se mueve en el mismo sentido que los brazos, pueden darse dos resultados según la orientación de la espiral: que el brazo de la galaxia apunte en la dirección del movimiento o que el brazo apunte en sentido contrario al movimiento. Las galaxias del primer escenario presentan brazos "en avance"; las galaxias del segundo escenario, brazos "en demora". Ambas posibilidades son equiprobables según la teoría.

En 1966 M. Fujimoto señaló que, en el trazado del brazo espiral, excluida la vecindad de la corrotación, el material del disco encuentra a la onda de densidad (o ésta a aquél) con una velocidad superior a la del sonido en el medio interestelar; el choque contra nubes de gas incrementaría la producción de estrellas y la luminosidad consiguiente.

Tres años más tarde, Alar Toomre demostraba que una onda de brazos en avance no era estable, sino que corría radialmente hacia el centro. El dilema del arrollamiento seguía abierto. Habría, además, otras ondas que se propagarían hacia la corrotación o desde ésta, dependiendo de su longitud de onda y de si adelantan o atrasan; sufrirían también grandes alteraciones al alcanzar las resonancias.

En línea con los resultados de Toomre, los trabajos posteriores de Lin, Y. Lau, James Mark y otros mostraron que las resonancias y la corrotación no desempeñaban un papel pasivo. Las ondas que se propagan radialmente hacia el centro se reflejan en la resonancia interna y aumentan su longitud de onda.

La onda reflejada, que se propaga radialmente hacia fuera, en parte se transmite y en parte se refleja al llegar a la corrotación. Lo mismo la onda transmitida que la reflejada han disminuido su longitud de onda. La onda transmitida es absorbida al llegar a la resonancia externa, mientras que la reflejada se propaga de vuelta al centro, amplificada por la conservación del momento angular. Se genera una superposición de modos espirales en el disco, que origina un patrón de ondas cuasiestacionario. A esa formulación mejorada de la teoría de ondas de densidad se la denomina teoría modal.

La nueva expresión permite explicar por qué las galaxias son, en su mayoría, de brazos en demora, tal y como mostraron los estudios de I. Pasha y colaboradores desde 1979. Y da cuenta de las galaxias barradas mediante la superposición, en la región central del disco, de una onda en demora y otra en avance.

Por lo que concierne a su posible origen, las ondas de densidad podrían resultar de las interacciones con otras galaxias, de distorsiones ovales del bulbo o a partir de la dinámica propia del disco.

Aunque las ondas de densidad fueron observadas en 1976 por el grupo de François Schweizer e, independientemente, por el de S. Strom, no se confirmó su ubicuidad hasta ocho años más tarde. En 1984 Debra y Bruce Elmegreen demostraron la presencia de ondas de densidad en los discos y resolvieron que las galaxias con brazos espirales más intensos y definidos poseían ondas con amplitudes mayores.

La teoría de la autopropagación aleatoria de la formación estelar se refinó tras la aparición de la teoría de ondas de densidad. Pero las primeras ideas sobre la posible propagación de la formación estelar de unas regiones a otras se remontan a E. Opik, quien, en 1953, sugirió que la compresión del gas para generar estrellas podría deberse a explosiones de supernova en regiones de formación estelar vecinas a la nube de gas.

En 1963, Walter Baade sugirió que la formación estelar de IC1613, galaxia irregular del Grupo Local distante unos dos millones y medio de años luz, se había producido mediante propagación de una región a otra. En 1964, Adriaan Blaauw ponía de manifiesto la existencia de secuencias de edad de un extremo al otro de ciertas asociaciones de estrellas de nuestra galaxia. En 1966, Bengt Westerlund y Donald Mathewson hallaron indicios que respaldaban la hipótesis de Opik. Descubrieron estrellas jóvenes en los bordes de burbujas de hidrógeno creadas por explosiones de supernova.

El terreno estaba abonado para que, en 1976, Mark Mueller y David Arnett incorporaran la autopropagación a una simulación de ordenador y crearan estructuras espirales. Muy poco realistas, desaparecían en unas pocas rotaciones galácticas. Mueller y Arnett partieron del supuesto de una propagación determinista, en cuya virtud una explosión de supernova desencadenaba un proceso de formación estelar en las regiones vecinas.

En 1978, Humberto Gerola y Philip Seiden introdujeron en el proceso una componente aleatoria. En su opinión, la formación estelar se autopropagaba a unas regiones sí y a otras no, según el valor asignado a una variable probabilística. En el seno de esa teoría, el proceso de formación de brazos se funda en modelos de simulación por ordenador, asignando valores arbitrarios a ciertas variables.

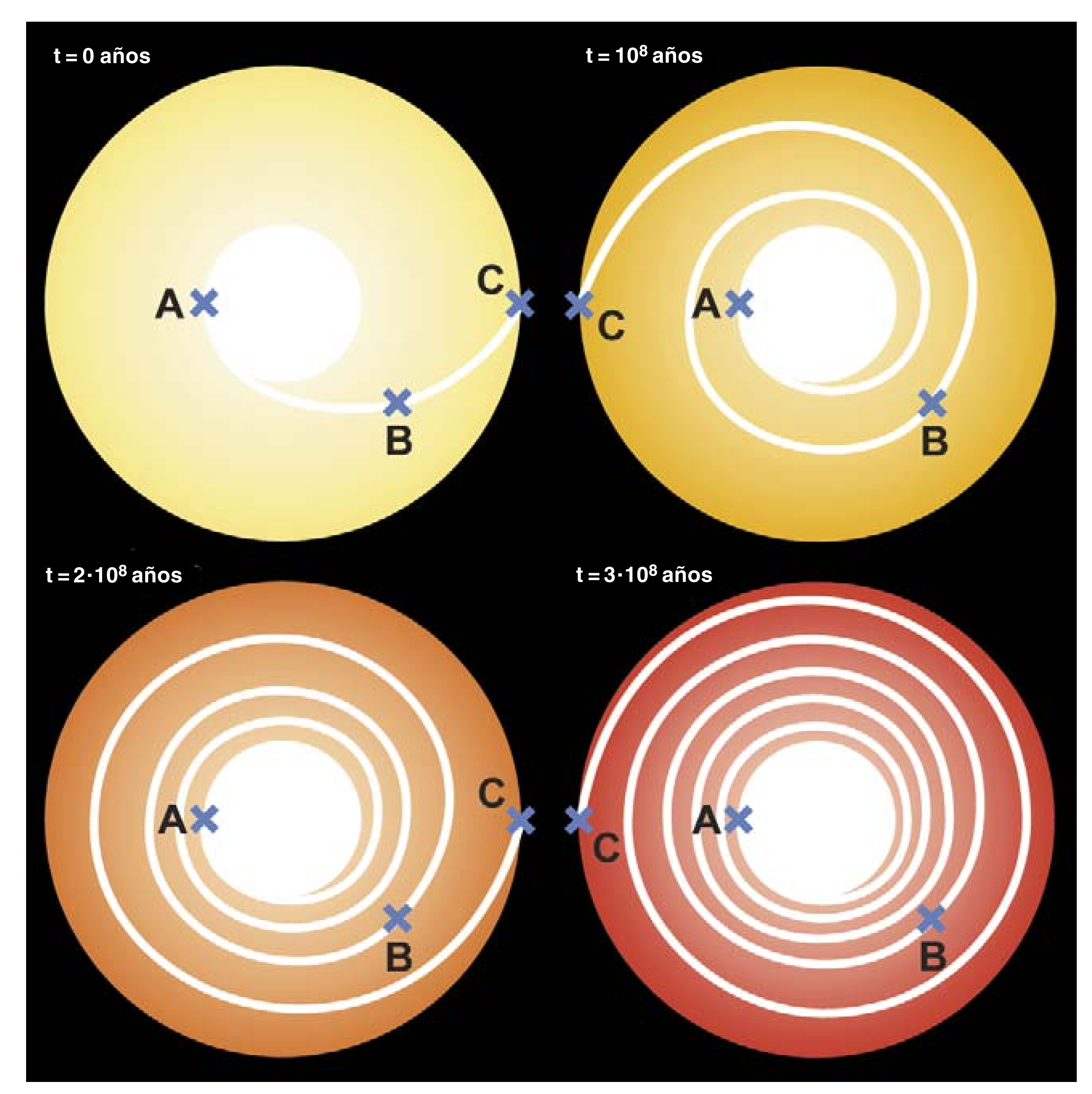
En la simulación de Gerola y Seiden se supone que el disco galáctico, infinitamente delgado, se halla dividido en celdas, de unos 650 años luz, que se mueven en rotación diferencial; las internas rotan más deprisa que

4. DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL, que representa la relación existente entre la luminosidad de las estrellas y su temperatura en la superficie. Las estrellas no se distribuyen uniformemente, sino que ocupan determinadas regiones. Las estrellas de la "secuencia principal", como nuestro Sol, dibujan una diagonal desde el extremo superior izquierdo, donde residen las estrellas de mayor tamaño, masa y temperatura, hasta el inferior derecho, donde se sitúan las menores, livianas y frías. Las "supergigantes", en la parte superior del diagrama, y las "gigantes", en el centro, a la derecha de la secuencia principal, son mucho más voluminosas que las estrellas de la secuencia principal; se han representado la quincuagésima parte de lo que les correspondería comparadas con éstas. Los colores y los tamaños relativos mostrados en el diagrama pretenden aproximarse a la realidad.

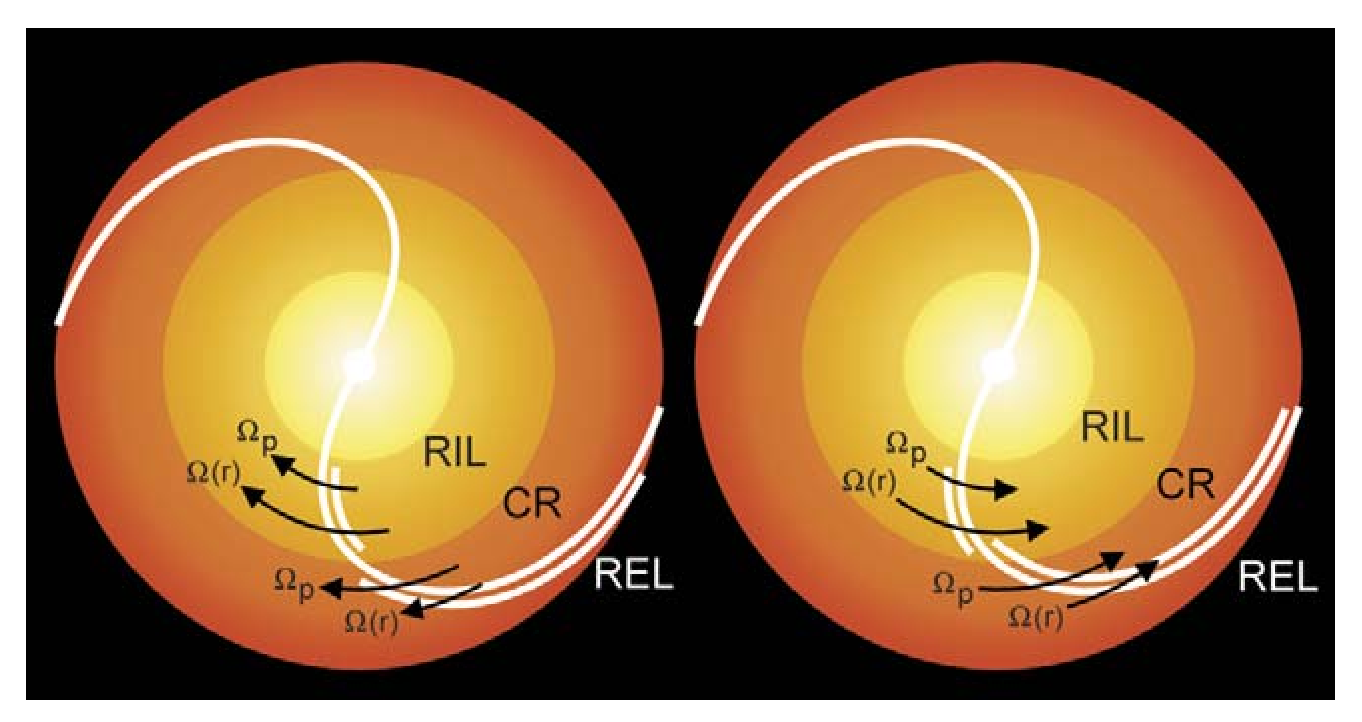
las externas, según una curva de rotación verosímil.

De acuerdo con el modelo, existe una probabilidad, pequeña aunque no nula, de que aparezca, espontáneo, un proceso de formación estelar en alguna de las celdas, que se va extendiendo a celdas vecinas, de una manera aleatoria y según el valor asignado a otra probabilidad.

Se introduce entonces la rotación diferencial. Las celdas a las que se ha propagado la formación estelar están rodeadas por nuevas celdas; a éstas puede, a su vez, propagarse de manera aleatoria la formación estelar. Se introduce de nuevo la rotación diferencial y se itera el proceso. Para reproducir al máximo las condiciones físicas del medio interestelar se añade un tiempo de recuperación; por



5. DILEMA DEL ARROLLAMIENTO. Las partes externas del disco de una galaxia espiral giran angularmente más despacio que las internas, fenómeno que se denomina "rotación diferencial". Por eso, si los brazos espirales fueran una estructura ligada a la cinemática del disco, se arrollarían sobre sí mismos adoptando una figura que no se observa en la realidad y terminarían por desaparecer. En la figura superior izquierda se ha representado un segmento de brazo espiral, que parte de un punto *A* situado en el borde del bulbo y termina en un punto *C* en el borde del disco. El punto *B* queda a medio camino entre *A* y *C*. Para un disco de tamaño medio y una curva de rotación típica, al cabo de cien millones de años el punto *A* habría dado una vuelta mientras que el punto *C* sólo media (*arriba, derecha*). Al cabo de doscientos millones de años el punto *A* habrá dado dos vueltas y el punto *C* una (*abajo, izquierda*). Después de trescientos millones de años el punto *A* habrá dado tres vueltas pero el punto *C* sólo una y media (*abajo, derecha*), y así sucesivamente. Tras un tiempo igual a la edad del universo, el punto *A* habrá dado cincuenta vueltas más que el punto *C*, por lo que no tendría ya sentido hablar de brazos espirales.



6. BRAZOS EN AVANCE Y EN DEMORA. Las ondas de densidad se producen sólo desde la resonancia interna de Lindblad (RIL) hasta la resonancia externa de Lindblad (REL). Podemos asimilar el movimiento de la onda de densidad al de un sólido rígido con cierta velocidad angular constante Ωp. El material del disco se mueve, en rotación diferencial, a una velocidad $\Omega(r)$. Entre la resonancia interna y la externa existe un radio, llamado de corrotación (CR), donde el material del disco y la onda de densidad tienen la misma velocidad de rotación alrededor del centro de la galaxia. Debido a la rotación diferencial, entre la resonancia interna y la corrotación la onda de densidad se mueve más despacio que el disco, y entre la corrotación y la resonancia externa sucede lo opuesto. Si los extremos de los brazos apuntan en la misma dirección en que se mueve el disco (*derecha*), se denominan "brazos en avance", y si apuntan en dirección contraria, "brazos en demora" (*izquierda*). La mayoría de galaxias observadas pertenecen a este último caso.

tal se entiende el tiempo que tarda una celda que ha formado estrellas en volver a estar en condiciones de engendrar más.

Además de calentar el medio interestelar, el fenómeno de la formación destruye las partes de la nube molecular próximas a las estrellas más calientes. La aleatoriedad del proceso no obedece a ningún azar intrínseco. No es obligado que determinada nube molecular se encuentre en un estado propicio para formar estrellas, pero sí podría ser que otra adyacente se hallara lista. Esa ambigüedad hay que incorporarla en el modelo. Y con ello introducimos información de la física local, imposible de obtener en procesos de macroescala.

Muy pronto aparecieron las objeciones al modelo que acabamos de exponer. De entrada, las variables —tamaño de las celdas, probabilidad espontánea, probabilidad inducida, tiempo de recuperación y otras— carecían de una interpretación física. El rango de valores que pueden adoptar no tiene otra justificación que la de originar espirales viables. Otros valores no crean ninguna estructura espiral o, si la generan, es transitoria.

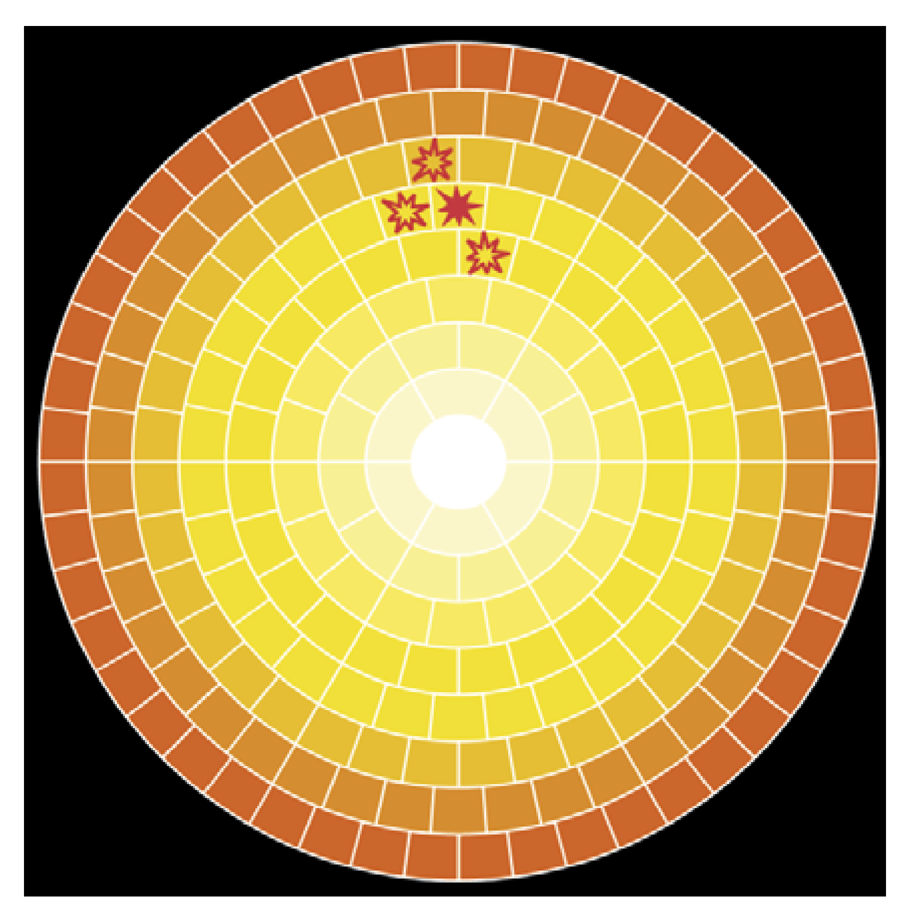
En 1983, Thomas Statler, Neil Comins y Bruce Smith se propusieron desarrollar un modelo tridimensional que incorporara el espesor del disco. No lo consiguieron. Las espirales que generaban eran muy poco definidas y transitorias. El esfuerzo pasó inadvertido. Nadie volvería a cuestionar el mecanismo de autopropagación aleatoria para explicar la estructura espiral.

Así las cosas, en 1998 me propuse con José Miguel González dilucidar la validez de los modelos tridimensionales de autopropagación. Con ese fin, desarrollamos un modelo de autopropagación en un disco tridimensional en rotación diferencial. Nuestro modelo, que genera brazos de aspecto y estabilidad similares a los del modelo bidimensional de Gerola y Seiden, demuestra que el proceso aleatorio tridimensional es viable.

Los brazos espirales que resultan con el modelo de autopropagación son cortos, numerosos y poco definidos, igual que algunas de las galaxias que se observan en el cielo. Por eso, los Elmegreen introdujeron, en 1982, una clasificación de las galaxias espirales según el grado de definición de los brazos. Habían hallado en 1984 que las galaxias con brazos mejor definidos tenían ondas de densidad de mayor amplitud. Propusieron que, en las galaxias de brazos continuos y mejor trazados, el proceso de formación estelar iba asociado a la onda de densidad, mientras que en el resto dominaba el mecanismo de autopropagación.

El asunto, empero, no era tan sencillo. En 1986, Stephen Lubow, Steven Balbus y Lennox Cowie descubrieron que la viscosidad del gas y la interacción gravitatoria entre el disco de gas y el disco de estrellas, independientes en el modelo de Lin y Shu, impedía el choque. Se descartaba, pues, la hipótesis de Fujimoto y la teoría de ondas de densidad se quedaba sin mecanismo de formación estelar.

En su trabajo de 1984, los Elmegreen sugerían que la razón de formación estelar no dependía de la amplitud de la onda de densidad. Dos años después, mostraron que las ondas de densidad no intensificaban la formación estelar. En 1986 apareció otro trabajo en la



7. AUTOPROPAGACION ALEATORIA. En este modelo el disco de una galaxia se considera compuesto por celdas de igual tamaño en rotación diferencial. La formación estelar que, espontánea o estimulada, se produce en una celda (estrella sólida) puede transmitirse de un modo aleatorio a celdas vecinas (estrellas huecas). Estas inducen, a su vez, la formación estelar a otras celdas inmediatas.

misma dirección, firmado por Marshall McCall y Fred Schmidt.

En las investigaciones de unos y otros se medía la razón de formación estelar promediada sobre todo el disco, para su posterior correlación con el grado de definición de los brazos espirales. Pero no había tal correlación. Y, sin ella, no podía atribuirse a los brazos espirales la formación estelar.

Ahora bien, para negar que las ondas de densidad influyan en la formación estelar no basta con apoyarse en la tasa de producción de estrellas por unidad de área. Hay que estudiar cada caso y comparar la formación estelar en los brazos con la generación en el resto del disco.

A finales de los ochenta se abrió camino la idea, cada vez más respaldada, de que el proceso de formación estelar debíase sólo a la autopropagación. En las galaxias de brazos mejor definidos la onda de densidad, cuya existencia quedaba asentada, reconducía el proceso de autopropagación, privilegiando las zonas de mayor densidad de gas.

Pero la autopropagación no justificaba ni la existencia de gradientes de edad y de color ni la eficiencia de la formación estelar. Yuri Efremov, en 1985, y T. Sitnik, en 1989, detectaron gradientes de edad en nuestra galaxia al atravesar un brazo espiral. También el grupo de Paul Hodge detectó, en 1990, gradientes de color en galaxias externas a la Vía Láctea.

En 1995, Soledad del Río y el autor midieron gradientes de color en los brazos de una muestra de galaxias espirales. Al relacionar tales gradientes con la posición de resonancias y corrotaciones, hallaron diferencias significativas entre las galaxias de brazos bien definidos y las de brazos de peor definición.

Desde 1989, mi grupo de la Universidad de La Laguna viene explorando distintos métodos para estimar la eficiencia de la formación estelar de los brazos comparada con la del resto del disco. En uno de aquellos primeros trabajos, investigué con John Beckman diversas galaxias de brazos bien definidos y de brazos peor trazados; observamos que, en las primeras, la eficiencia de formación de estrellas de alta masa era mayor en los brazos que en el resto del disco, mientras que en las galaxias de brazos peor trazados era del mismo orden. Resultados que fueron confirmados por Linda Tacconi y Judith Young, en 1990, Christine Wilson y Nicholas Scoville, en 1991, y el grupo de Johan Knapen en los trabajos que viene desarrollando desde 1992.

No había acuerdo entre las dos hipótesis sobre el mecanismo dominante en la formación estelar a gran escala. Ambas daban por supuesto que la función inicial de masas era la misma en los brazos que en el resto del disco.

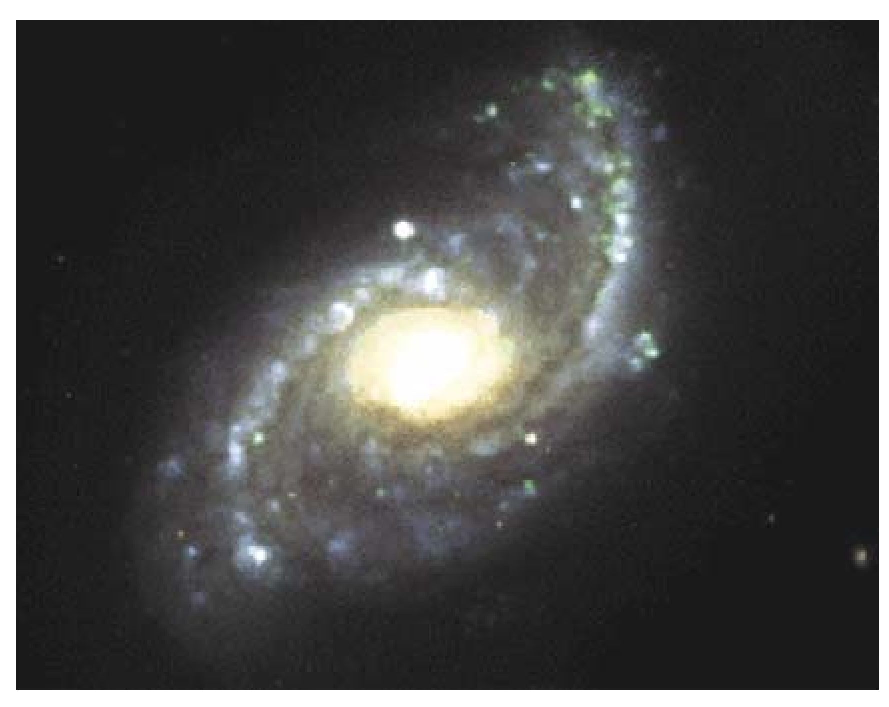
Ahora bien, si la función inicial de masas en los brazos favoreciese la formación de una fracción mayor de estrellas de alta masa, más luminosas, que en el resto del disco, mediríamos una mayor eficiencia de formación de estrellas masivas en los brazos. Ese mayor rendimiento en la gestación estelar no tenía por qué implicar que fuera mayor la eficiencia global, es decir, considerando la masa total de estrellas de todo el rango de masas.

Pero si medir la eficiencia de formación estelar no es sencillo, reviste bastante más complejidad estimar la función inicial de masas, incluso en nuestra propia galaxia. Desde 1995, vengo desarrollando con Fernando de Pablos un método alternativo para estimar eficiencias de formación estelar de todo rango de masas. Comparamos dichas cantidades en los brazos con respecto al resto del disco. En tal procedimiento, sin embargo, acotamos los valores que pueden adoptar las funciones iniciales de masa de los brazos y del resto del disco.

De acuerdo con los resultados que hemos obtenido con una muestra de galaxias de brazos bien trazados, las funciones iniciales de masa difieren en los brazos y éstos alcanzan un éxito menor que el disco a la hora de engendrar estrellas de todas las masas, aunque le superen en producción de estrellas más masivas. Eso por lo que concierne a la mayoría de las galaxias de nuestra muestra. En otras, pocas, la eficiencia de formación de estrellas de todas las masas es mayor en los brazos que en el resto del disco, sin que haya diferencias en las funciones iniciales de masa.



8. GALAXIA ESPIRAL NGC 628, en imagen combinada de varias obtenidas con el telescopio IAC-80 instalado en el Observatorio del Teide, del Instituto de Astrofísica de Canarias, y con el telescopio de 2,2 metros del MPIA en el Centro Astronómico Hispano-Alemán de Calar Alto (Almería). En esta galaxia, el proceso de formación estelar en los brazos espirales no es más eficiente que en el resto del disco, sino que la función inicial de masas está sesgada en favor de una mayor fracción de estrellas masivas.



9. GALAXIA ESPIRAL NGC 5248. Imagen en color obtenida por combinación de varias en el telescopio Isaac Newton (2,5 metros) del grupo Isaac Newton e instalado en el Observatorio del Roque de Los Muchachos (La Palma), del Instituto de Astrofísica de Canarias. En esta galaxia singular la función inicial de masas en los brazos está sesgada hacia una mayor fracción de estrellas masivas. Los brazos alcanzan también un rendimiento mayor que el resto del disco en la producción de estrellas.

En galaxias de brazos bien definidos, la eficiencia de formación de estrellas masivas es mayor en esas proyecciones braquiales. Mas, al ser distinta aquí la función inicial de masas, no crean una masa total de estrellas mayor que el resto del disco. No acontece tal fenómeno en galaxias de brazos peor trazados. Por tanto, habrá que concluir que las ondas de densidad intervienen en la formación estelar, aumentando su rendimiento o alterando la función inicial de masas, de suerte tal que los brazos constituyan una fracción mayor de estrellas más masivas y luminosas que el resto del disco.

En 1998, José Miguel González y el autor incorporaban una onda de densidad en el modelo de autopropagación tridimensional. Además de obtener brazos mucho mejor definidos, lo cual era de esperar, llegaron a conclusiones de interés. Primera, si la onda de densidad es de brazos en avance, la estructura espiral desaparece. Segunda, la autopropagación desarrolla los brazos más allá de la resonancia externa de Lindblad, cerrándolos hasta casi producir un anillo en algunos casos.

La segunda consecuencia podría dar cuenta de algunas discrepancias en la estimación de las posiciones que se otorgan a las resonancias para las mismas galaxias; además se observan anillos en una fracción apreciable de galaxias.

A tenor, pues, de las características del medio interestelar y de la amplitud de la onda de densidad, ocurrirá que se intensificará la formación estelar en el brazo o se alterará la función inicial de masas. Con ello no queda desentrañado, en absoluto, el proceso de formación estelar en galaxias. Pero se sube un escalón más hacia la comprensión de las leyes que la regulan.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TRIGGERED STAR FORMATION. B. Elmegreen en *Star Formation in Stellar Systems*, Cambridge University Press, págs. 381-478, 1992.

LARGE SCALE PROPAGATING STELLAR FORMATION. J. Franco en *Star Formation in Stellar Systems*, Cambridge University Press, págs. 515-573, 1992.

SPIRAL STRUCTURE IN GALAXIES. G. Bertin y C. C. Lin. The MIT Press 1996.

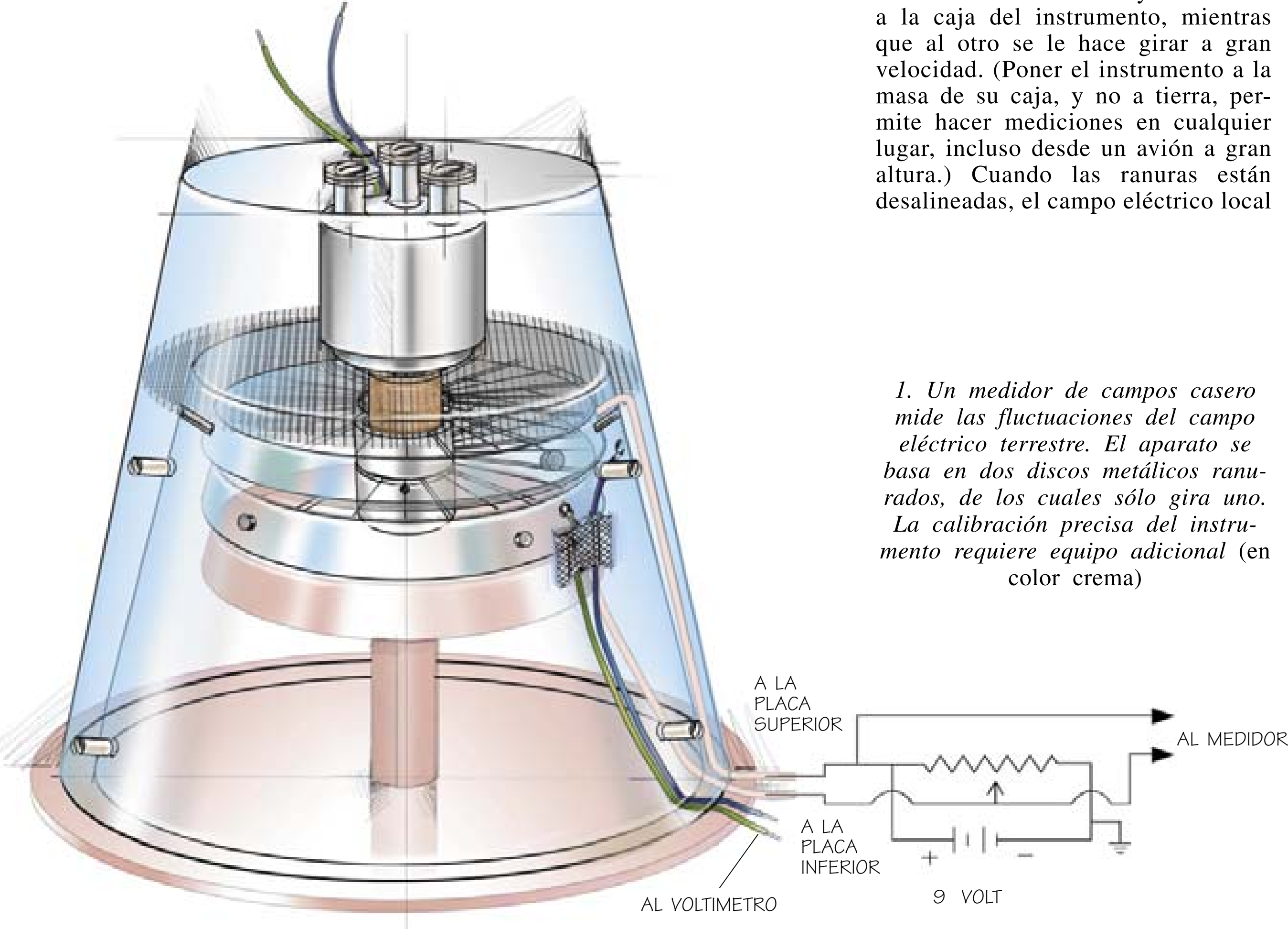
Shawn Carlson

Detección de la electricidad atmosférica

Si los campos eléctricos fuesen visibles, hasta el lugar más yermo de la Tierra ofrecería un aspecto impresionante. Situados en lo alto de un cerro veríamos una selva de líneas de campo eléctrico que se proyectarían por todas partes desde el suelo hacia la atmósfera. Se podría observar cómo se extienden por el horizonte y cómo se reúnen cuando se forman tormentas. De hecho el campo eléctrico terrestre es mucho más dinámico que el magnético y a mí me parece más interesante.

Tal fenómeno eléctrico se debe a los millares de tormentas que descargan continuamente sobre nuestro planeta, con una media de cien rayos por segundo, aparte de la tremenda cantidad de carga transportada por las gotas de lluvia [*véase* "Medición de la electricidad de las gotas de lluvia", en Taller y Laboratorio, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 1997]. El resultado es que vivimos sobre un océano de cargas negativas que genera un campo eléctrico de aproximadamente 100 volt por metro de altura. Dicho de otro modo, cuando estamos de pie tenemos la cabeza a unos 200 volt más que los pies. Y cuando una tormenta pasa por el aire, los campos eléctricos pueden aumentar hasta miles de volt por metro. Por suerte, en el aire que nos rodea hay muy pocas cargas libres (electrones y iones positivos sueltos), por lo que esos voltajes tan elevados no pueden crear corrientes eléctricas intensas, que sin duda nos electrocutarían.

Para observar el campo eléctrico terrestre he montado un instrumento casero muy preciso que puede construirse por poco dinero. Se trata básicamente de una encarnación barata de un medidor de campos, aparato que mide los campos eléctricos mediante dos discos metálicos ranurados montados sobre un mismo eje y cuyas superficies están muy próximas. Uno de ellos está inmóvil y conectado a la caja del instrumento, mientras que al otro se le hace girar a gran velocidad. (Poner el instrumento a la masa de su caja, y no a tierra, permite hacer mediciones en cualquier lugar, incluso desde un avión a gran altura.) Cuando las ranuras están desalineadas, el campo eléctrico local



1. Un medidor de campos casero mide las fluctuaciones del campo eléctrico terrestre. El aparato se basa en dos discos metálicos ranurados, de los cuales sólo gira uno. La calibración precisa del instrumento requiere equipo adicional (en color crema)

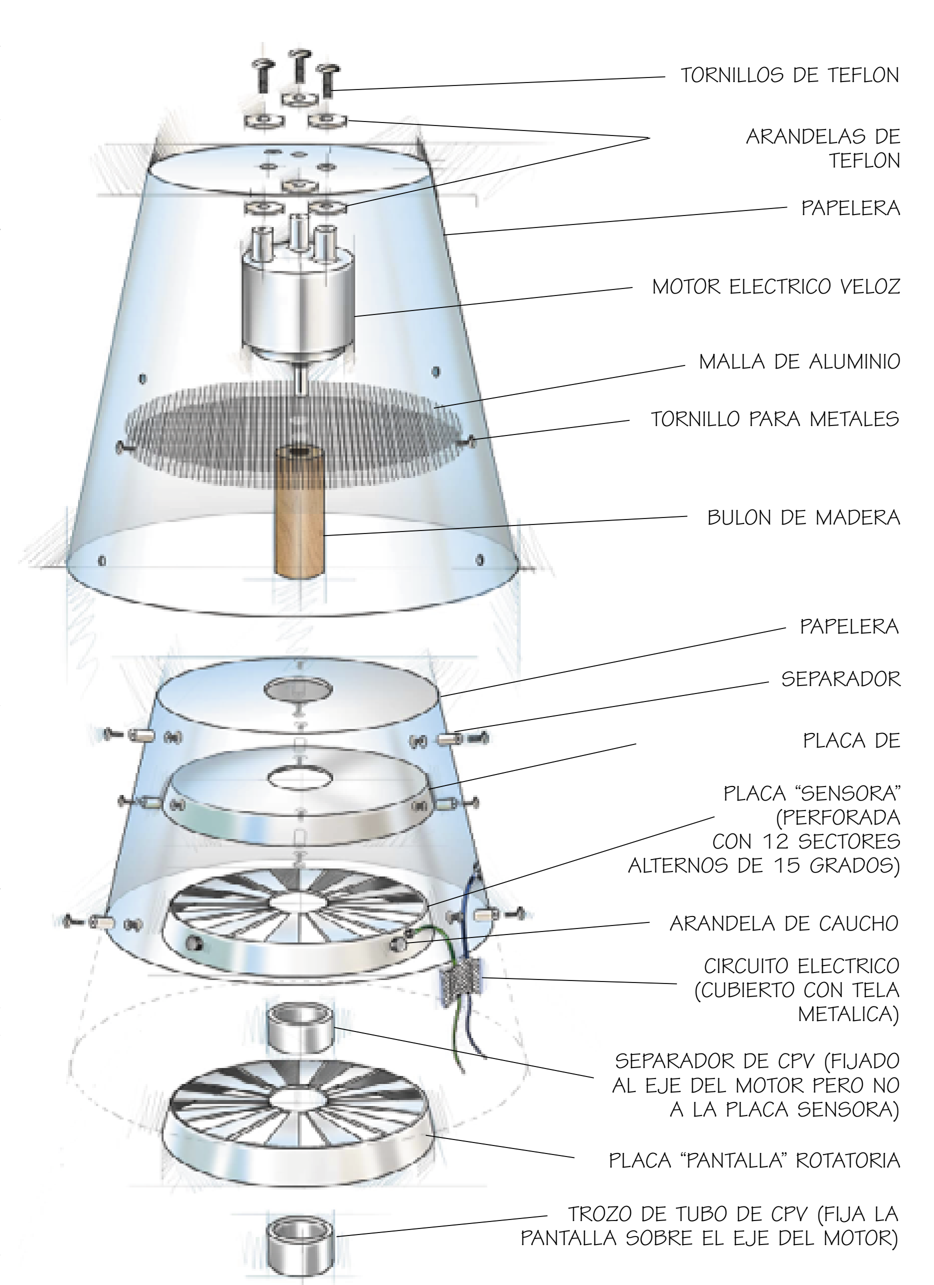
llega a la placa superior y extrae a masa parte de su carga libre. Pero como los conductores bloquean los campos eléctricos, la placa inferior apantalla a la superior cuando los sectores metálicos están enfrentados, con lo que pueden retornar las cargas expulsadas. Así, haciendo girar la placa inferior, se consigue una corriente que fluye en uno y otro sentido por el cable de masa; tales impulsos pueden detectarse con un circuito sencillo.

Mi detector de campo lo improvisé con un par de moldes de repostería, cuyas bases circulares perforé, quitándoles doce gajos de 15 grados, regularmente espaciados (las ranuras). Para hacer girar la placa móvil utilicé un motor eléctrico rápido sobrante; vale cualquiera que gire entre 1000 y 7000 revoluciones por minuto. A esas velocidades y con las bateas de repostería recortadas con los gajos de 15 grados, el campo terrestre genera en el cable de masa impulsos de corriente de unos cuantos nanoampere y de frecuencias comprendidas entre 200 hertz (a 1000 rpm) y 1400 hertz (a 7000 rpm). Estas señales pueden observarse sin dificultad con un circuito que contenga un amplificador de transconductancia y un detector de picos (*véase la figura 3).* De hecho, mi instrumento casero detecta fácilmente variaciones de una milésima parte del campo local. Si se utiliza un ordenador para analizar los datos, pueden seguirse las fluctuaciones de manera comparable a la de los instrumentos profesionales.

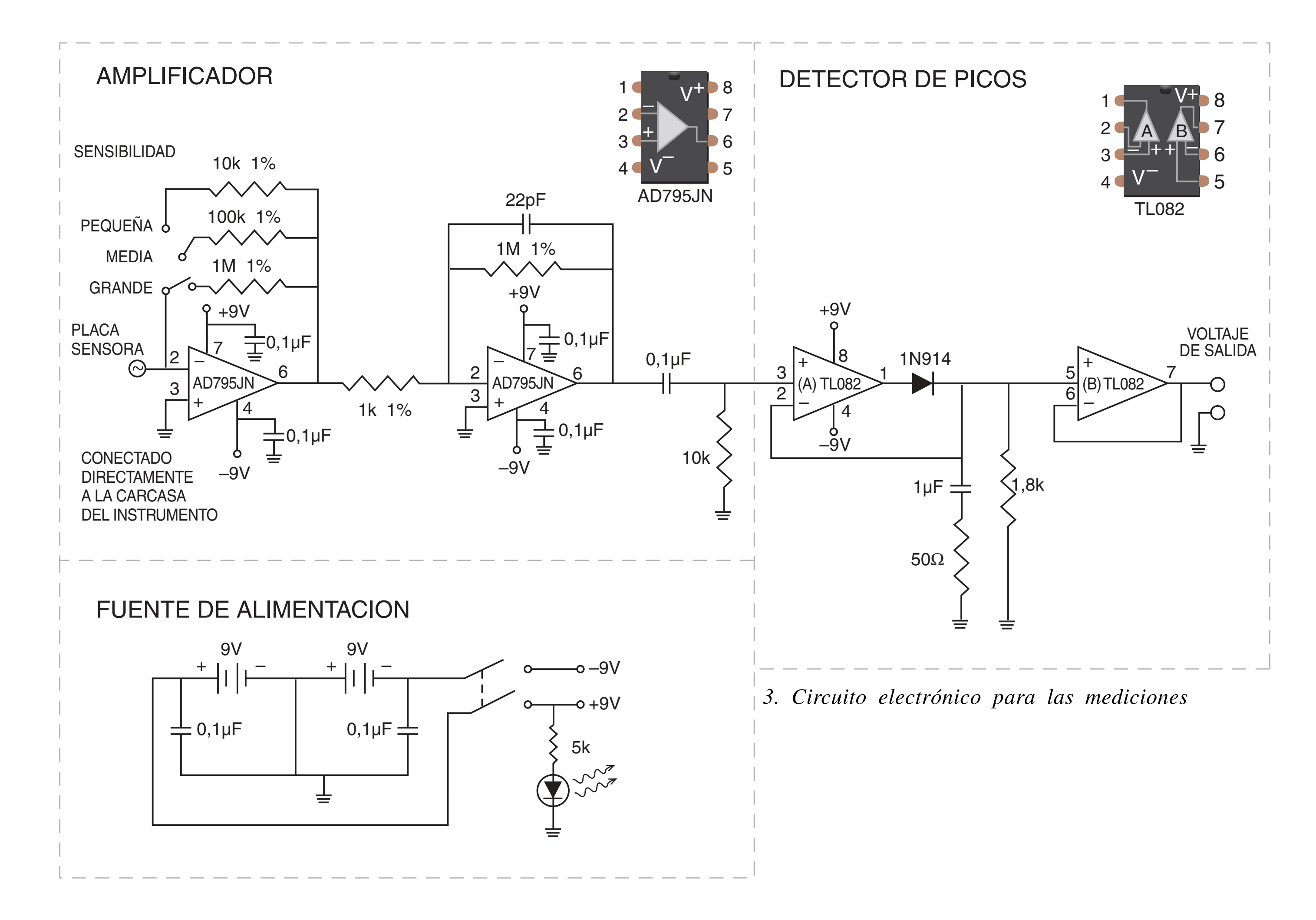
El aparato puede construirse aprovechando un fin de semana. Primero se traza el contorno de los sectores de 15 grados sobre la cara interna de uno de los moldes con un transportador. Luego se sujetan ambos fuertemente con abrazaderas sobre un círculo de contrachapado (para facilitar el corte) y con una sierra de calar se recortan los sectores, que así resultarán idénticos. Uno de los moldes servirá como disco sensor y el otro como pantalla rotatoria.

Como todos los motores eléctricos generan parásitos electromagnéticos intolerables, hay que tomar ciertas precauciones. Incluso el eje metálico despide tan perjudicial energía, por lo que si la pantalla rotatoria estuviera directamente conectada a él, la radiación se extendería entre ambas placas, que es donde el instrumento es más sensible al ruido. Para evitar tal degradación, se le añade al eje un suplemento no conductor, tal como un bulón de madera de 25 mm de diámetro. Con una taladradora fijada a un soporte vertical se abre un hueco preciso a lo largo del centro del bulón, al que luego se fija el eje del motor con epoxia. A continuación se aísla eléctricamente el motor montándolo coaxialmente con tornillos y arandelas de teflón por la parte interior de una papelera metálica, puesta boca abajo. La mayoría de la radiación indeseable puede quedar confinada mediante dos capas de malla de aluminio.

A una segunda papelera metálica se le corta lo necesario para que quepa dentro de la primera cuando ésta ya tenga el motor montado. Luego se taladra un orificio por los centros de la placa sensora y de una tercera placa (que servirá para calibrar nuestro instrumento), agujeros por los que tendrá que poder pasar holgadamente el bulón. Durante la operación de calibrado habrá que cargar esa tercera placa, por lo que hay que fijar un cable conductor a su superficie externa con una epoxia metalizada conductora. Tres pequeñas arandelas de caucho colocadas sobre los bordes



2. Montaje vertical de los distintos componentes del medidor de campos, entre los que se cuentan dos moldes de repostería cuyos fondos se encuentran recortados



3. *Circuito electrónico para las mediciones*

de las bateas sensora y de calibrado las mantendrán próximas pero sin tocarse. El conjunto se atornillará a la papelera interna a través de separadores aislantes, taladrándose en ella un orificio para dar salida a los cables.

El circuito electrónico tiene que fijarse a la papelera interna justo por debajo de la batea sensora. Para reducir las interferencias, acórtense al máximo los cables de entrada y los que lo conectan a la papelera interna, aparte de recubrirlo por completo con tela metálica. Es necesario que toda la corriente de señal pase por el amplificador, por lo que hay que asegurarse de que el único contacto eléctrico entre la placa sensora y la papelera sean los cables de masa.

Se instala el conjunto dentro de la papelera externa, volviendo a utilizar arandelas aislantes. Se corta un anillo de un centímetro de altura exactamente del extremo de un tubo de plástico de 25 mm de diámetro interior, que servirá como separador central, insertándolo sobre el bulón de madera de manera que apoye contra la batea sensora. Una vez determinada la posición correcta, se pega al eje con epoxia, procurando que no se pegue a la placa sensora, lo que impediría el giro. Se termina abriendo un orificio en el centro de la placa pantalla, de modo que se la pueda fijar sobre el bulón entre el primer espaciador y otro segundo igual.

Para calibrar el instrumento hay que encolar un cuarto molde en uno de los extremos de un taco, colocando en el otro una lámina metálica grande (para apantallar el campo magnético terrestre), accesorio que introducimos dentro del conjunto de papeleras. La aplicación de un voltaje entre las placas superior e inferior generará un campo eléctrico de valor parecido al terrestre. Si la separación entre dichas placas fuese de dos centímetros, una diferencia de tensión de dos volt entre ellas creará un campo de 100 volt por metro dentro del instrumento.

La calibración del rango inferior puede hacerse con una pila de nueve volt y un reostato. La simulación del campo generado por una tormenta fuerte requiere tensiones de 200 volt, que no es difícil procurarse, aunque haya de tenerse en cuenta el carácter mortal que pueden presentar las descargas de estos aparatos si son capaces de generar intensidades de corriente apreciables, por lo que es necesario tener mucho cuidado.

Este medidor de campos se usa al aire libre, alejado de edificaciones, ya sea suspendido de un poste o colocado sobre un aro aislante. En ambos casos hay que asegurarse de que nada se interponga entre su abertura y la tierra. La señal puede llevarse al interior de la vivienda a través de un cable coaxial, de modo que pueda observarse cómodamente el campo eléctrico en cualesquiera condiciones meteorológicas.

Para más información acerca de este y otros proyectos, consúltese la página de la Society for Amateur Scientists en www.thesphere.com/SAS/WebX.cgi. También se puede escribir a la sociedad a 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117, o llamar al teléfono 619-239.88.07.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

El arte de la teselación elegante

Muchos son los puntos de contacto entre las matemáticas y las artes; ninguno más hermoso que el concepto de simetría. El enfoque matemático de la simetría resulta quizá demasiado rígido para la mayoría de las artes plásticas; aun así puede aplicarse sin dificultad a cualquier forma artística que exhiba configuraciones repetitivas. El papel de empapelar, los tejidos y las teselas son ejemplos bien conocidos, que pueden todos alcanzar gran altura artística. Los azulejos y los empapelados que diseñó William Morris, un pintor británico del siglo XIX, se exhiben en el Victoria and Albert Museum de Londres. El museo Edo-Tokio posee ejemplos absolutamente sobresalientes de kimonos decorados y el palacio de la Alhambra, en Granada, es conocido en todo el mundo por sus intrincados motivos decorativos.

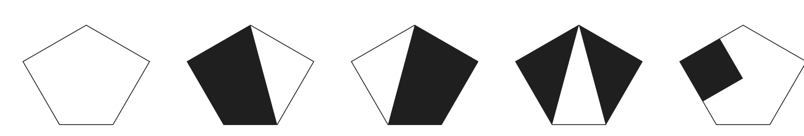
Aunque los aspectos matemáticos básicos de la simetría y de las teselaciones hayan sido elaborados largo ha, se siguen haciendo nuevos descubrimientos, logrados, muchas veces, por artistas plásticos. Rosemary Grazebook, una artista británica de nuestros días, ha inventado un sistema de teselado de notoria sencillez, eminentemente práctico y que, al mismo tiempo, se diferencia lo suficiente de las teselas rectangulares para ser interesante. Es además ingenioso y, tratado por las manos adecuadas, hermoso.

La definición matemática de simetría es sencilla, pero sutil. Una simetría de un diseño es una transformación que lo deja invariable. Por ejemplo, aplicada a un cuadrado, la transformación “rotación de 90 grados en torno a su centro” produce un cuadrado indistinguible del inicial. La transformación “reflexión de derecha a izquierda” deja (aparentemente) invariable a la figura humana. Un diseño puede tener muchas simetrías diferentes; la colección de todas ellas constituye su grupo de simetría.

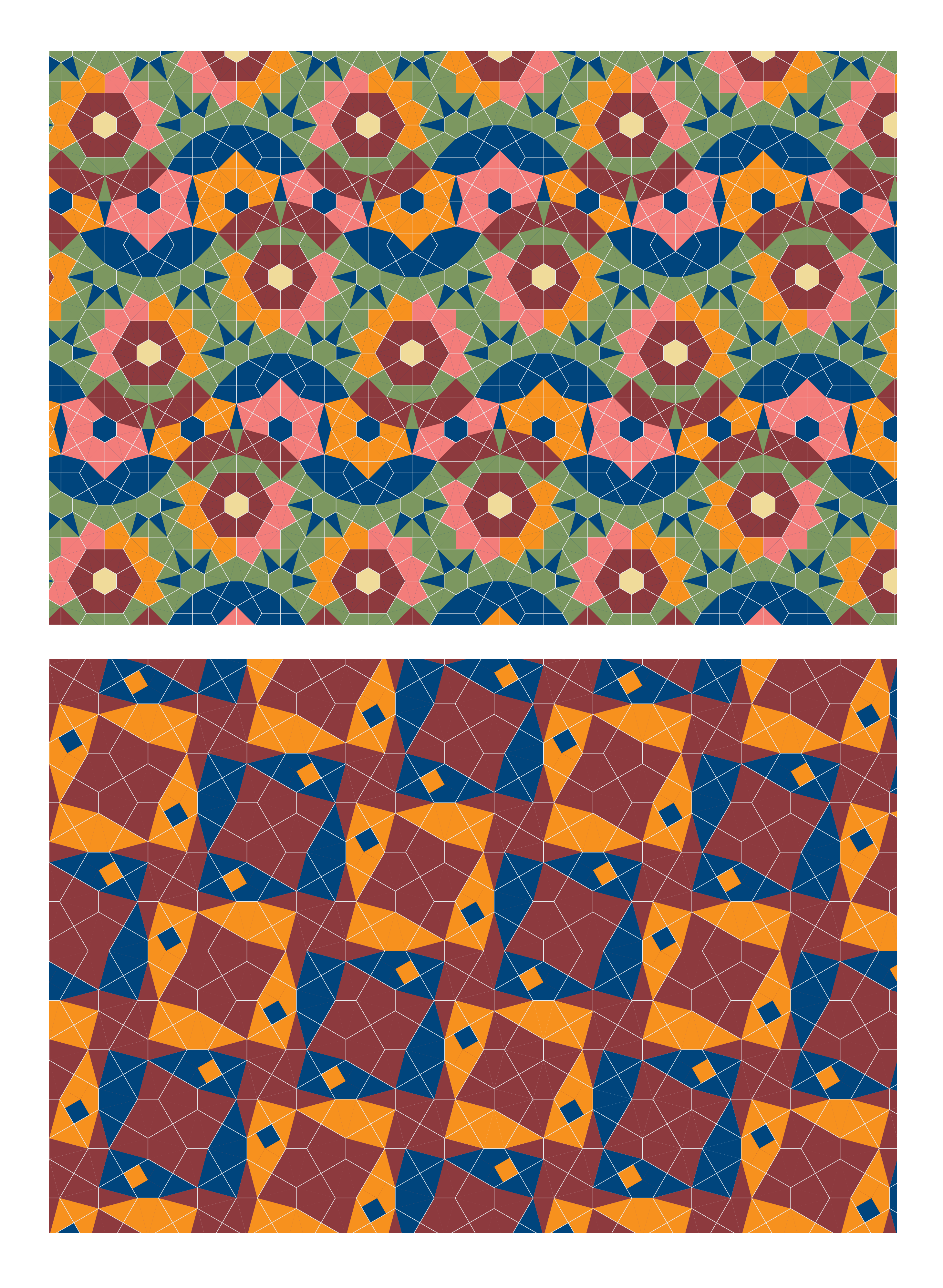
Son muchos también los tipos de teselaciones. El que tradicionalmente ha atraído más el interés de los matemáticos se basa en un retículo bidimensional, lo que en realidad es un cristal plano. Resulta irónico que el análisis matemático se empezase a elaborar para el caso tridimensional, que es enormemente difícil; sólo mucho después se acometió en dos dimensiones. El cristalógrafo ruso E. S. Fedorov demostró en 1891 que los retículos planos se clasifican en 17 tipos distintos de simetría (*véase la figura 2*). Otro tanto vale para los motivos decorativos de los tejidos y de los empapelados. Esta afirmación puede parecer chocante, habida cuenta de que cualquier tienda de decoración del hogar puede presentarnos docenas de gruesos muestrarios de empapelados, así como innumerables paneles de losetas y de azulejos. En la mayoría de los casos, sin embargo, las diferencias residen en el color, la textura, o la naturaleza de los elementos del motivo subyacente. Por importantes que éstas sean para el cliente, en nada afectan a las propiedades de simetría del motivo, excepto en que pueden estar constreñidas por él. Por ejemplo, unos azulejos de baño decorados con patitos tendrían la misma simetría que otros similares decorados con fragmentos de algas, a menos que existan elementos simétricos extra en las propias figuras decorativas.

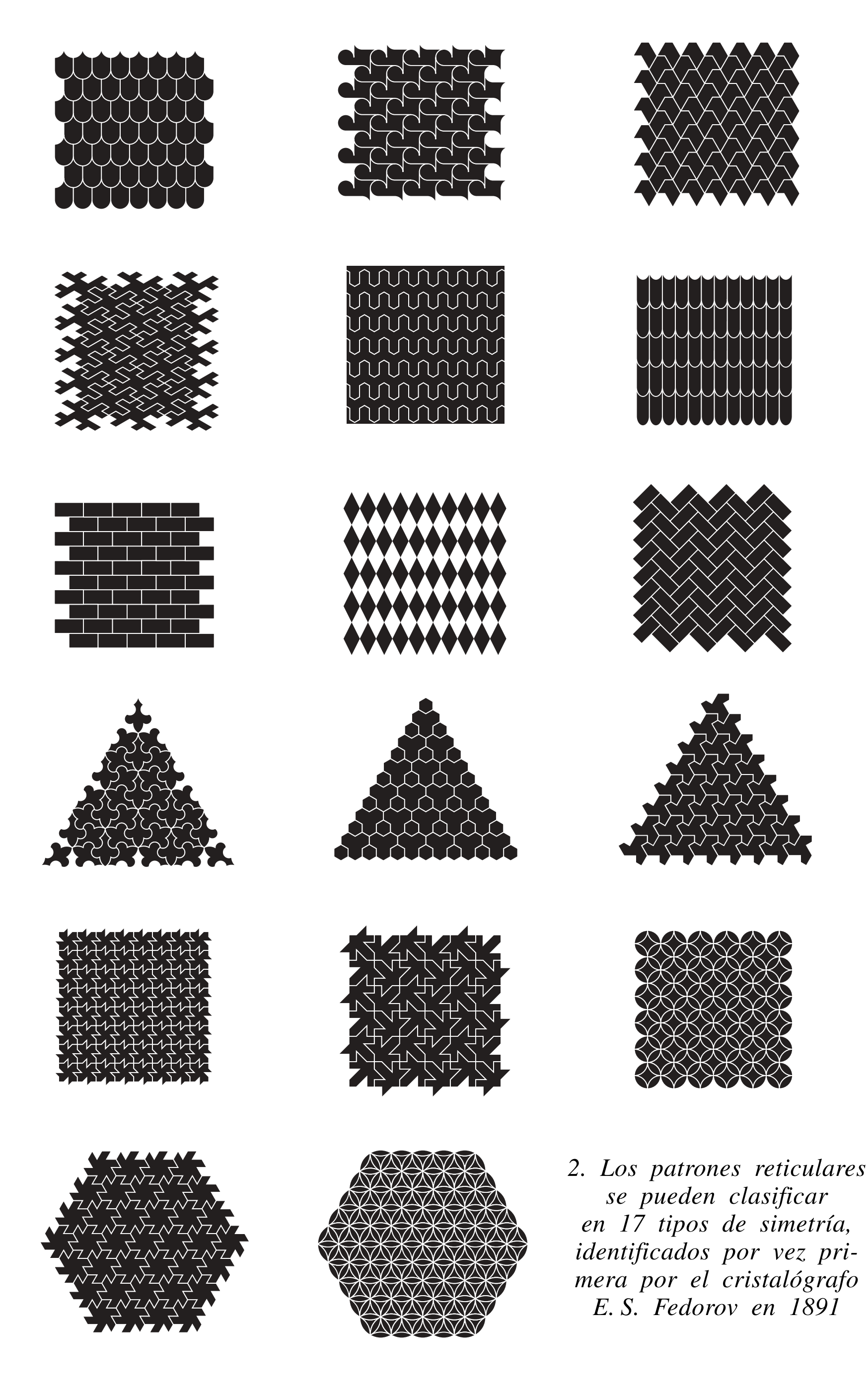
Hay muchas configuraciones que carecen de simetría o que tienen muy poca; no las trataré aquí. Entre ellas se cuentan descubrimientos recientes e importantes, como las famosas teselas de Penrose, que recubren completamente el plano sin repetir nunca exactamente una misma disposición. Los motivos que ahora nos interesan se centran en una “región fundamental”, es decir, en una pauta que se repite indefinidamente en dos direcciones independientes. Imaginemos, por ejemplo, una formación de azulejos normales, cuadrados, tan frecuentes en los cuartos de baño. Las paredes de nuestro imaginario cuarto de baño, sin embargo, son infinitamente grandes, por lo que el motivo no tiene fin. Seleccionemos un azulejo cualquiera. El motivo de ese azulejo se repetirá en las direcciones horizontal y vertical y en las combinaciones de una y otra. En efecto, si desplazamos la baldosa horizontalmente un número entero cualquiera de anchuras, hacia la derecha o hacia la izquierda, y después verticalmente, otro número entero de alturas, hacia arriba o hacia abajo, encontraremos una loseta idéntica. Así que la pauta se repite en dos direcciones distintas. En este caso se da la circunstancia de que tales direcciones son perpendiculares, pero ello no es necesario en general.

Al hablar de retículo se quiere expresar la existencia de dos direcciones como las precedentes. La simetría reticular resulta natural en los empapelados y en los tejidos, porque normalmente, al ser fabricados, se forma un rollo de producto a lo largo del cual se repite una y otra vez un mismo motivo —posiblemente impreso por un tambor rotatorio o tejido por una máquina que repite un ciclo fijo—. Al pegar el papel a la pared, o cuando el tejido se cose para cubrir una región más ancha, es costumbre hacer que los motivos casen a lo largo de la costura. Pero tal casamiento puede provocar lo que los decoradores de interiores conocen por una “caída”: hay que desplazar el papel primero lateralmente y después una cierta distancia hacia arriba o hacia abajo. Si hay caída, el retículo es periódico, pero según dos direcciones no perpendiculares.



1. Losetas pentagonales que, coloreadas como se indica, pueden formar una teselación reticular, sea en conjunción con hexágonos regulares (página siguiente, arriba) *o por sí solas* (página siguiente, abajo)





2. Los patrones reticulares se pueden clasificar en 17 tipos de simetría, identificados por vez primera por el cristalógrafo E. S. Fedorov en 1891

La condición reticular es menos natural para baldosas y azulejos, que se fabrican uno por uno, pero sí proporcionan al artista un plan sencillo a seguir cuando las coloca en el suelo o en una pared. El retículo de azulejos cuadrados, típico del cuarto de baño, por ejemplo, tiene simetrías de rotación de 90 en 90 grados. Posee también simetrías axiales, o simetrías por reflexión en un espejo, respecto de rectas verticales, horizontales y diagonales que pasen por el centro de las losetas, por un vértice o por el punto medio de cualquiera de sus lados. También es un retículo un enlosado en panal, formado por hexágonos regulares, aunque posea otro tipo de simetrías, a saber, las de rotación en ángulo de 60 grados y sus múltiplos. Puede verse una exposición más detallada de los patrones reticulares en *Symmetry and Chaos*, por Michael Field y Martin Golubitsky (Oxford University Press, 1992).

Grazebrook descubrió que una determinada loseta pentagonal puede servir de pieza básica para multitud de motivos reticulares. Una característica esencial de su loseta es que tiene dos ángulos de 90 grados y tres de 120 grados, lo que permite disponer las losetas en retículos tanto cuadrados como hexagonales (*véase la figura 1*). Una loseta cuadrada, en cambio, no posee ángulos más que de 90 grados, por lo que solamente puede formar unos pocos retículos diferentes. Ensamblando cuatro de las losetas pentagonales de Grazebrook se puede construir un hexágono ancho y bajo, que tesela el plano como los ladrillos en una pared. Por combinación de las losetas pentagonales con hexágonos regulares, se pueden conseguir todos, menos uno, de los 17 tipos de simetría de los motivos reticulares. (Dejo para los lectores el placer de descubrir cuál es el tipo de simetría que falta y la forma de construir los otros 16.)

Grazebrook sacó la idea de estas teselas de esta misma sección o, para ser más exactos, de los inimitables artículos de *Juegos matemáticos* de Martin Gardner. Se encontraba realizando estudios de doctorado en el Royal College of Art de Londres, centrados en el arte islámico de la Alhambra. Había empezado una tesis titulada “Desde el Islam a Escher y más allá...” (Es más que probable que los lectores estén familiarizados con los notables dibujos de M. C. Escher, muchos de los cuales utilizan losetas con forma de seres vivos, dispuestas en configuraciones matemáticas.) Grazebrook presentía la existencia de una relación entre el arte islámico y las peculiares pautas de teselación de Escher, pero no se percató de que el vínculo es la teoría de los 17 tipos de simetría de los retículos hasta haber leído el artículo de Gardner. A partir de ese punto comenzó a explorar maneras de construir motivos islámicos a partir de diversas parrillas basadas en retículos.

Grazebrook introdujo dos sistemas distintos para colorear sus losetas pentagonales. Uno de ellos consiste en dividir la tesela en tres triángulos; se obtiene así el llamado “conjunto Pentland”. El otro estriba en dividir el pentágono en cuatro regiones: dos cuadrados, un cuadrilátero con forma de cometa y un pentágono más pequeño. Se tiene así el conjunto “Penthouse”. Desde luego es posible dividir y colorear las losetas de otras muchas formas, pero estos dos conjuntos por sí solos bastan para generar una increíble variedad de diseños. Los aquí mostrados tienen derechos de autor y los esquemas de coloreado están registrados. Los fabricantes de losetas que sientan interés por ellos pueden contactar con Grazebrook en P. O. Box 32 ISLEWORTH, TW7 6FB, U.K.

James Burke

Dando la nota

Uno de los recursos de que me valgo para relajarme (y que produce el efecto contrario en cuantos me rodean) consiste en rasguear la guitarra clásica, sin mucha pericia, por cierto. El otro día me arranqué silbando además "Yankee Doodle". A medida que me iba sumergiendo en el grave asunto de las escalas, volví a intentar tocar los "Recuerdos de la Alhambra", sin éxito. Pero se me encendió una lucecita interior: me vino a la memoria que la solución matemática de las escalas había llegado con el renacimiento holandés, de las geniales manos de Simon Stevin, pionero de las fracciones decimales, consejero militar del conde Mauricio de Nassau e ingeniero de astilleros. A él también se debe la división de la octava en los semitonos con los que mantenía mi duelo.

Cabe suponer que Stevin hubiese salido a almorzar el día de 1608 en que un desconocido visionario local, de nombre Hans Lippershey, se asomó por el palacio de Mauricio con un nuevo ingenio para ayudar al conde en su tenaz empeño de convertir al ejército holandés en una fuerza bien pertrechada con la que desalojar a los españoles (algo que andando el tiempo conseguiría). Lippershey traía consigo un largo tubo con sendas lentes en cada extremo que, decía, servía para mirar. Cuenta la historia que Mauricio masculló algo relativo a binoculares y lo despidió quedándose con la mosca tras de la oreja. De lo siguiente que nos enteramos es de lo sucedido en 1609. Galileo se hizo con los componentes del ingenio y construyó el suyo. Iba a cambiar el rumbo de la historia al poner de manifiesto que en la Luna había montañas. Iría más lejos. Demostraría que la Tierra no ocupaba el centro del cosmos, al descubrir la formación de satélites que giraban en torno a otro cuerpo celeste, el planeta Júpiter.

El concepto de sistema solar lo había ya esbozado Copérnico unos cien años antes, con las secuelas que experimentaría más tarde el propio Galileo. Cometió éste otros crímenes, no menos nefandos que el del heliocentrismo. Uno de ellos fue animar a los investigadores a hacer algo con la nada. Con el vacío. No se daba por descontado que existiera, pues se suponía que hasta el último rincón del universo se llenaba de la presencia de Dios. Todo empezó en 1630, cuando Galileo abordó el problema de la incapacidad de las bombas de succión para subir agua desde más de nueve metros. Una cuestión de peso cuando perforamos pozos para alimentar las fontanas ducales de Florencia. Galileo le pasó el embrollo a uno de sus acólitos, Evangelista Torricelli (quien vivió en la casa del maestro durante los últimos años de éste y terminó por sucederle en el cargo de matemático y filósofo del duque de Toscana).

La reflexión de Torricelli le llevó a una columna de mercurio encerrada en un tubo, colocado boca abajo en una cubeta del mismo metal. Parte del mercurio del tubo se deslizaba hacia la cubeta, pero otra parte se mantenía en forma de columna encaramada *casi* hasta el extremo del tubo. ¿Qué había en ese *casi*? El imposible, y como el lector imaginará, heterodoxo vacío. Durante varios días Torricelli observó que el nivel del mercurio del tubo subía y bajaba. ¿Tenía eso que ver con la cambiante presión del aire, ejercida sobre la superficie del que había en la cubeta y abastecía la columna?

Una copia de cierta carta secreta sobre tan arriesgada idea, remitida por Torricelli a un colega inquieto que vivía en Roma y que respondía al nombre de Michelangelo Ricci, cayó en manos de la única persona que estaba preparada para hacer algo al respecto. Hablo de Marin Mersenne, un sacerdote y científico de París que tenía la agenda mejor surtida de Europa. Mersenne pertenecía a esa raza de individuos que quizá no sepan la respuesta, pero sí saben quién es capaz de darla. En este caso, el quídam tendría que encontrar una fábrica de vidrio, por ser los largos tubos de vidrio un componente esencial del engranaje de la experimentación con el vacío. Y no era un material que se pudiera comprar en la tienda de abajo. A menos que viviéramos en la ciudad cristalera de Ruán, lo que era el caso.

Estaba luego el asunto de las cumbres. Ruán se extiende en una llanura feliz y nuestro hombre quería llevarse el mercurio hasta un pico importante para comprobar si era verdad que la altura implicaba menos presión de aire y la caída de la columna. Por fortuna, Clermont-Ferrand, en el ombligo de Francia, tenía las montañas. Y tenía también a su cuñado François Périer, un sujeto voluntarioso y capaz. El 19 de septiembre

de 1648 Périer se encumbró al Puy de Dôme y anduvo arriba y abajo. Y eso mismo hizo la altura de su columna de mercurio, comportándose como un barómetro. Lo que selló la reputación del sujeto que le envió a esas alturas (exactamente hasta 1480 metros): su cuñado Blaise Pascal.

Pascal era un genio de la matemática que pergeñó la primera calculadora operativa. Le obsesionaba la teoría del azar y la probabilidad, lo que le acarreó sus más y sus menos con Roma, vinculado como estaba con los jansenistas. Estos reformistas católicos seguían la doctrina del preste holandés Cornelius Jansen, quien atacaba el probabilismo de los jesuitas ("lo que pensamos no es probablemente pecado si la autoridad eclesiástica lo niega"). Los jansenistas, *au contraire*, se apuntaban al probabiliorismo ("nunca se sabe. Es más probable que sea pecado que que no lo sea; por tanto, abstengámonos").

Pongámonos en su piel. Criticar a los jesuitas era entonces tomar el camino directo hacia la aniquilación. En 1705 una bula papal exigía a sacerdotes y monjas jansenistas que dejaran de hacerlo o que abandonaran los hábitos. Que es justamente lo que hizo el padre Michel de L'Épée, quien terminó en París, abriendo una escuela donde enseñaba el lenguaje de los signos a los sordomudos. Tarea que bordó. En cierta sesión de demostración uno de sus alumnos aventajados respondió a doscientas preguntas en tres idiomas. En 1779 dirigía la escuela Roch-Ambroise Sicard, quien terminó el diccionario de signos que había empezado L'Épée.

En 1815 aprendía esa técnica de enseñanza un norteamericano, Thomas Gallaudet. Dos años más tarde establecía el Asilo Connecticut para Sordomudos en Hartford. Cierto inmigrante escocés cubría en 1872 una vacante de dos meses en el asilo, para convertirse luego en profesor de fisiología de la voz en la Universidad de Boston. Mientras intentaba desarrollar un sistema para ayudar a los sordos a "ver" o a "sentir" los sonidos hasta el punto de imitarlos, prestó especial atención al mecanismo en cuya virtud funcionaba el tímpano. En su tenacidad halló un modo de provocar que una membrana vibrante generase una corriente eléctrica que a su vez hiciera vibrar otra membrana. Con todo ello el profesor Alexander Graham Bell obtuvo un resultado formidable: el teléfono. Pero Bell no era lo que se dice un experto en electricidad, por lo que buscó acertadamente el consejo de una eminencia, el a la sazón secretario de la Institución Smithsoniana, Joseph Henry.

Tiempo atrás Henry había sido tutor en la mansión de los van Rensselaer, hacendados holandeses que venían poseyendo buena parte del estado de Nueva York desde el siglo XVII. En 1642, en la ciudad de Rensselaer, a orillas del río Hudson se construyó Fort Crailo para defender a sus habitantes. Cuenta la tradición que fue en esa fortaleza donde Richard Shuckburgh, un médico inglés, compuso la tonada que yo silbaba al comienzo de la sección.

Bueno, volvamos a las escalas.

LIBROS

Comunicaciones

En España

ATLAS HISTÓRICO DE LAS COMUNICACIONES EN ESPAÑA (1700-1998), por Angel Bahamonde Magro, Gaspar Enríquez Lorente y Luis Enrique Otero Carvajal. Museo Postal y Telegráfico; Madrid, 1998.

He aquí un libro cuyo texto, o mejor aún textos, supera en atractivo al de su soporte físico, y éste posee un atractivo que dista mucho de ser escaso. Valga esta afirmación como dirigida, no particularmente a historiadores ni a especialistas en las diversas ramas de las comunicaciones, sino a cualquier lector potencial completamente ajeno a tales disciplinas. Lo cierto es que los textos captan, quizá cautiven, la atención desde las primeras líneas de la presentación y acaso sea ello tanto más cierto cuanto más ignorante se sea del tema que a lo largo de las páginas se desarrolla y que no es sino "la representación detallada de la construcción en su dinámica evolutiva de las redes comunicacionales en España y sus conexiones con el exterior desde principios del siglo XVIII hasta finales del siglo XX".

En su primera acepción, atlas es una colección de mapas geográficos reunidos en un volumen. No parece, pues, que el texto haya de representar un papel preponderante en un libro cuyo título comience por esa palabra. Pero no es así en este caso, ya que a lo largo de sus 304 páginas nuestra obra ofrece unas muy interesantes, y sustanciosas, líneas introductorias a la cartografía correspondiente a cada uno de los temas o de las épocas que va considerando a través de la exposición. Esas líneas introductorias, redactadas a modo de presentación del contenido de cada capítulo, no superan en ningún caso las dos páginas a doble columna, pero bastan para trazar un cuadro perfectamente comprensible para un público general de las circunstancias y hechos bajo los que tomaron cuerpo las realizaciones materiales representadas en la cartografía de época incluida en cada capítulo.

La obra está organizada en ocho capítulos, de los cuales cinco están dedicados a la historia del correo en España desde la llegada del primer Borbón, a principios del siglo XVIII ("El Correo Ilustrado"), hasta nuestra época, dos al telégrafo y su desarrollo a lo largo del siglo XIX, empezando por las primitivas líneas de telegrafía óptica para ocuparse luego de los inicios y evolución de la telegrafía eléctrica, incluida la aventura de los cables submarinos, y uno, el último, a las telecomunicaciones en el siglo XX (de 1900 a 1998).

En cada capítulo, a la introducción que ya mencionamos sigue una colección de mapas que se corresponden con el texto de aquélla. Las fuentes, de índole y nacionalidad diversa, a las que recurrieron los autores posibilitaron a éstos consultar del orden de 2500 mapas. De éstos seleccionaron 250 para reproducir en su obra. Esos mapas se ofrecen en espléndidas reproducciones acompañados de datos técnicos y de un comentario que complementa el texto de la introducción, aunque realmente acaso sea ésta la consecuencia del contenido de los comentarios, pues es en esos comentarios donde se da noticia de las realidades representadas por cada mapa.

No sería razonable terminar esta reseña sin señalar que "Atlas Histórico de las Comunicaciones en España (1700-1998)" no es sólo un libro muy interesante por el tema, entretenido por su lectura y atractivo por su presentación, sino también una pequeña obra de arte a tener en cuenta por quienes disfrutan de un libro leyéndolo y además teniéndolo en los anaqueles de su biblioteca.

José Vilardell

Química

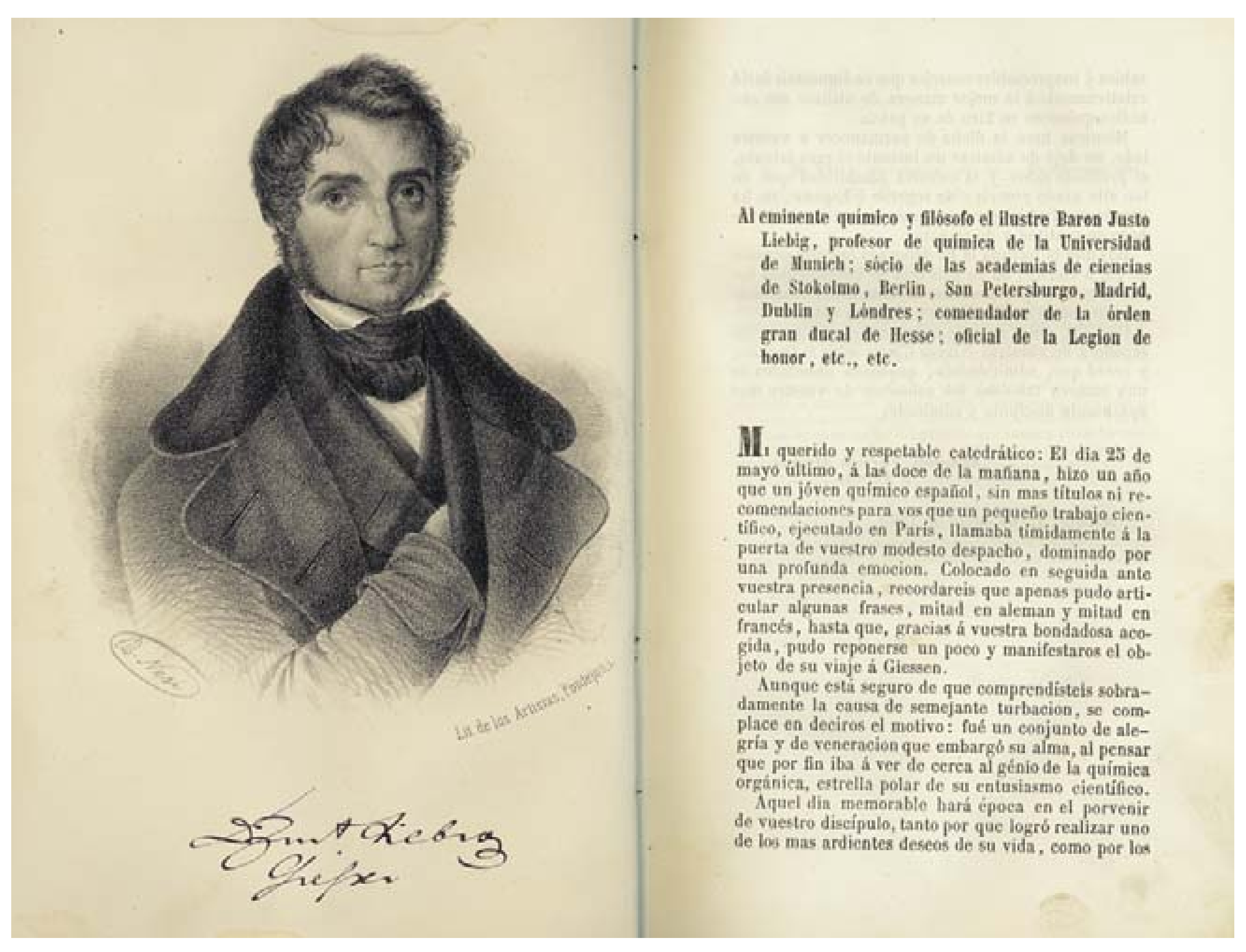
Ciencia de la molécula

THE MAKING OF THE CHEMIST. THE SOCIAL HISTORY OF CHEMISTRY IN EUROPE 1789-1914. Dirigido por David Knight y Helge Kragh. Cambridge University Press; Cambridge, 1998. **JUSTUS VON LIEBIG UND HERMANN KOLBE IN IHREN BRIEFEN, 1846-1873**. Edición preparada por Alan J. Rocke y Emil Heuser. Bionomica-Verlag; Mannheim, 1994. **FRIEDRICH JULIUS OTTO (1809-1870)**, por Ursula Pohl. Deutscher Apotheker Verlag; Stuttgart, 1998.

THE AGE OF THE MOLECULE. Dirigido por Nina Hall. Royal Society of Chemistry; Londres, 1999. **LA CHIMIE SUPRAMOLÉCULAIRE. CONCEPTS ET PERSPECTIVES**, por Jean-Marie Lehn. DeBoeck Université; París, 1997. **CHEMICALS AND LONG-TERM ECONOMIC GROWTH. INSIGHTS FROM THE CHEMICAL INDUSTRY**. Dirigido por Ashih Arora, Ralph Landau y Nathan Rosenberg. John Wiley and Sons; Nueva York, 1998.

HANS CHRISTIAN OERSTED. SELECTED SCIENTIFIC WORKS. Edición preparada por Karen Jelved, Andrew D. Jackson y Ole Knudsen. Introducción de Andrew D. Wilson. Princeton University Press; Princeton, 1997. **PHILOSOPHERS IN THE LABORATORY**. Dirigido por Valeria Mosini. Editrice Universitaria di Roma-La Goliardica; Roma, 1996.

Propio de la química es construir nuevas formas de materia a partir de las preexistentes. Sea por los plásticos, los detergentes o las medicinas, nuestra vida se desenvuelve entera en un entorno químico. Lo ha sido, aunque con distinta intensidad, desde que el hombre fue aprendiendo a fermentar la bebida, colorear el vestido o fabricar el vidrio. La habilidad no venía, empero, respaldada por un entramado teórico, si somos severos con la química precedente a Antoine Lavoisier, a su *Traité élémentaire de chimie* y a los *Annales de chimie*. Con Lavoisier no sólo nace una nueva nomenclatura; se aclara la naturaleza fundamental de la combustión y se instala la investigación química sobre bases cuantitativas, que exigirán la decantación del concepto moderno de elemento. La teoría química describía la estructura de las combinaciones, que resumían las relaciones entre los cuerpos.



Al eminente químico y filósofo el ilustre Baron Justo Liebig, profesor de química de la Universidad de Munich; sócio de las academias de ciencias de Stokolmo, Berlin, San Petersburgo, Madrid, Dublin y Lóndres; comendador de la órden gran ducal de Hesse; oficial de la Legion de honor, etc., etc.

Mi querido y respetable catedrático: El dia 25 de mayo último, á las doce de la mañana, hizo un año que un jóven químico español, sin mas títulos ni recomendaciones para vos que un pequeño trabajo científico, ejecutado en Paris, llamaba tímidamente á la puerta de vuestro modesto despacho, dominado por una profunda emocion. Colocado en seguida ante vuestra presencia, recordareis que apenas pudo articular algunas frases, mitad en aleman y mitad en francés, hasta que, gracias á vuestra bondadosa acogida, pudo reponerse un poco y manifestaros el objeto de su viaje á Giessen.

Aunque está seguro de que comprendisteis sobradamente la causa de semejante turbacion, se complace en deciros el motivo: fué un conjunto de alegría y de veneracion que embargó su alma, al pensar que por fin iba á ver de cerca al génio de la química orgánica, estrella polar de su entusiasmo científico.

Aquel dia memorable hará época en el porvenir de vuestro discípulo, tanto por que logró realizar uno de los mas ardientes deseos de su vida, como por los

Fragmento de la epístola preliminar de Ramón Torres Muñoz a su traducción de Nuevas cartas sobre la química*, de Liebig*

El nuevo pensamiento químico de 1789 aporta el combustible de la revolución industrial que sembró Europa de telares y fábricas de jabones y vidrios. En los talleres textiles, el cloruro de cal facilitaba el blanqueado; Nicolas Leblanc preparaba el carbonato sódico requerido en el procesamiento de los segundos. La química se fue asentando en la centuria siguiente hasta transformar la vida académica y alumbrar la figura del científico profesional, *The Making of the Chemist*. Con ese título se pasa revista a la historia social de la química en 15 países, agrupados en una triple categoría de naciones creadoras de química, importadoras de química e intermedias. Recordemos a vuela pluma las primeras, es decir, la situación en Francia, Alemania e Inglaterra.

Tras la época del Terror, comprobado que la química desempeñó un papel decisivo en la logística de guerra, se incluyó su enseñanza en las nuevas escuelas secundarias. Igual que se impuso, al doblar el siglo, en las recién creadas facultades de farmacia de París, Estrasburgo y Montpellier. O en la Escuela Central de Artes y Oficios, en cuyos cursos se dictaba química general, química analítica y química industrial. Uno de los primeros químicos en vincularse a la industria había sido J. L. Gay-Lussac, impulsor, desde 1818, del análisis volumétrico para medir ácidos y álcalis. Privado era también el laboratorio de Jean-Baptiste Dumas. Por esos y otros que se multiplicaron en París en los años treinta y cuarenta, pasaban los alumnos de las instituciones públicas que buscaban formarse o hallar empleo como preparador o repetidor.

Para debatir en reuniones periódicas las nuevas ideas, difundirlas a través de un *Bulletin* y habilitar una biblioteca de consulta propia se creó en 1857 la Société Chimique de París. A finales de 1858 ingresaban en ella Auguste Cahours, Louis Pasteur y Henri Sainte-Claire Deville. Dumas fue elegido presidente y Adolph Wurtz, secretario. En el camino hacia una mayor especialización se segregaban o instituían cátedras, como la de química orgánica en el Collège de France, confiada a Marcellin Berthollet. Pero no era oro tanto relumbre. De ese sueño los despertó la guerra franco-prusiana. La derrota de Sedan en septiembre de 1870 puso de manifiesto la inferioridad de la ciencia francesa. Se reclamó una reforma profunda y mayor vinculación entre química e industria. La que se esperaba del laboratorio de química aplicada a la industria de la Sorbona (1896), que formaría parte del Instituto de Química establecido diez años después.

En Alemania, la generalización de la enseñanza de la química en la educación media se remonta al último tercio del siglo XVIII, momento en que nace



En 1848, Louis Pasteur mostraba que las sales de ácido tartárico cristalizaban en formas especulares que podían separarse

HO — CO_2H ⋮ HO_2C — OH
HO — CO_2H ⋮ HO_2C — OH

el Instituto Pedagógico de Jóvenes Químicos (1779). Se multiplican las escuelas politécnicas. La Universidad de Göttingen abre un aula de química analítica en 1805; la de Landshut en 1807 y la de Erfurt en 1809. El laboratorio se torna complemento obligado de la cátedra. Después de un prolongado magisterio de Stromeyer, la química alemana pivota en torno a Justus von Liebig. Trabaja éste en la Universidad de Giessen. Allí establece un método sencillo y fiable de análisis, de cuya potencia media Europa se hace lenguas y allí envía a sus jóvenes promesas. Al principio sus alumnos son farmacéuticos; en el borde de los años cuarenta, serán químicos *tout court*.

La fama del laboratorio de Giessen se extiende pronto al de Göttingen. Al de Marburgo y Heidelberg. Al de Munich. Si en 1830 la mayoría de las universidades alemanas sólo tenían un profesor de química, en 1870 gozaban, en promedio, de dos cátedras. A ello había que sumar la especialización de los institutos politécnicos de Dresden y Karlsruhe. En 1867 se erige la *Deutsche Chemische Gesellschaft zu Berlin*.

Pese a la rivalidad con Francia y el progreso de la química neumática, Inglaterra adoptó en seguida el nuevo lenguaje de Lavoisier. Además, la inauguración en 1799 de la Regia Institución incardina el laboratorio a la sala de conferencias (donde John Dalton presentó su teoría atómica) y la biblioteca. Con el nombramiento presidencial de Davy en 1801 se convierte en centro de investigación química, que alcanzará su máximo desarrollo a lo largo de la centuria con Faraday. Davy, que aisló el potasio y el sodio, demostró que el cloruro sódico no tenía oxígeno, considerado hasta entonces por definición "generador de ácidos".

La Sociedad Química de Londres, establecida en 1841, precedió en cuatro años al Colegio Real de Química, cuyo primer profesor de orgánica, A. W. Hofmann, alumno de Liebig, importó y adaptó los métodos analíticos de su maestro, vía que siguió otro alumno de Liebig, Alexander William Williamson, sucesor de Hofmann. Antes de la Sociedad existía ya el Colegio Universitario de Londres, cuyo departamento de química desde 1837 estaba encabezado por Thomas Graham, que, en reciprocidad, influyó en la docencia alemana.

En ese concierto, la voz de España carece de timbre propio. Considerada como ciencia útil, la química ocupa una atención preferente en la renovación carolina de la ciencia aplicada. Conocidos son los casos de nuestros pensionados o la contratación de expertos foráneos, con Joseph-Louis Proust y François Chavaneau a la cabeza. Los laboratorios que se crean en Madrid y Barcelona no pasan del decoro y la discreción. Quizás el de mayor repercusión social fuera el ligado a la figura de Francisco Carbonell. La entrada de la química en la universidad se produce en la segunda mitad del siglo, que fomenta cierta fiebre traductora. Sobresale del nivel medio Ramón Torres Muñoz, que aprendió de Liebig los fundamentos de química agrícola.



Basado en las nuevas ideas estereoquímicas, Emil Fischer logró la síntesis de la primera molécula orgánica compleja, la D-glucosa en 1890

O=C—H
H—C—OH
HO—C—H
H—C—OH
H—C—OH
CH_2OH

Empiezan a menudear los estudios sobre Justus von Liebig, desde la publicación del epistolario con otro químico de relieve, *Justus von Liebig und Hermann Kolbe in ihren Briefen*. A través de los juicios expresados en las cartas podemos asomarnos a la evolución de la química alemana. Liebig, que nació en Darmstadt en 1803 y estudió en Bonn y Erlangen, se consideró discípulo de Gay-Lussac, a cuya vera permaneció dos años. Perfeccionó los aparatos de análisis, que le aportaron una eficaz base metodológica, dirigió los *Annalen der Pharmacie*, que le sirvieron de plataforma, y llevó la enseñanza al laboratorio. En una primera etapa de investigación básica estudió los compuestos benzoíl, acetil y etil. Para terminar refugiándose en la vertiente agrícola y fisiológica de la química, en las sustancias reactivas, los metabolitos y los productos finales.

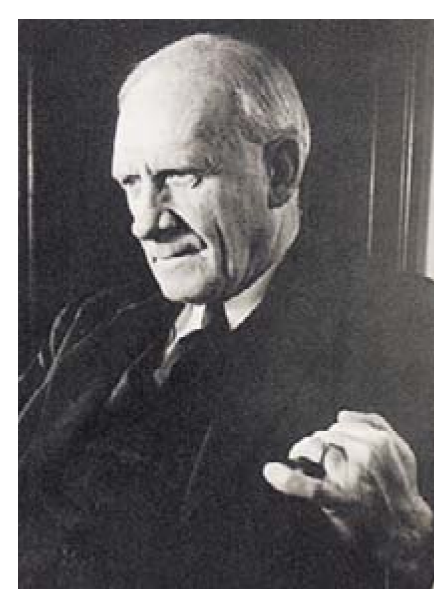
Friedrich Wöhler, amigo de Liebig, había sido invitado a la Universidad de Göttingen en 1836, dos años antes de que Kolbe llamara a la puerta. El primer trabajo de Kolbe se desarrolló en torno a un tema fronterizo entre química orgánica e inorgánica y culminó en la producción de ácido acético a partir de carbono inorgánico y agua, sirviéndose también de azufre y cloro. Se trataba de la primera síntesis total realizada por un químico orgánico. Andando el tiempo, adoptó elementos esenciales de la teoría de tipos, formulando lo que él llamó la "teoría del ácido carbónico" (*Kohlensäuretheorie*). A su juicio, todos los compuestos orgánicos podían considerarse derivados de una substitución simple del oxígeno y del ácido carbónico por radicales. Liebig opinaba que la química orgánica sólo tenía sentido si operaba en conjunción con la fisiología. Puesto que el ácido carbónico desempeñaba un papel central en fisiología vegetal, la teoría de Kolbe adquiría pleno sentido.

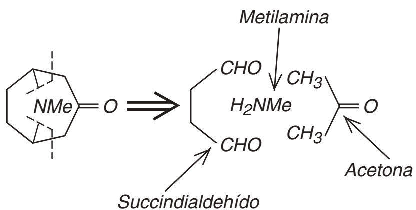
Amigo de Kolbe, se carteó también con Liebig y fue el arquetipo del investigador académico que se aplicó

a la renovación de la farmacia por la química. Nos referimos a *Friedrich Julius Otto* (1809-1870), biografiado por Ursula Pohl. Se formó en Jena con Johann Wolfgang Döbereiner, profesor de química general y física, y Heinrich Ferdinand Wackenroder, que enseñaba historia natural y botánica general. Con el título bajo el brazo llegó al Carolinum de Braunschweig. A lo largo de su larga carrera académica daría clases de química farmacéutica, química analítica, química forense y farmacognosia. Y, por supuesto, química orgánica. Trasiego que se refleja en la obra escrita.

Defiende su tesis de grado con un ensayo de laboratorio sobre el contenido ácido del vinagre. Ese mismo año de 1832 trabaja también en la determinación cuantitativa y cualitativa del ácido fosfórico y sus sales. En la revista de Liebig publica muy pronto una prueba de química vegetal acerca de la solanina. Lo que no empece que, a propósito de un ensayo inmediato, comente el de Giessen: "Si el doctor Otto no puede dedicarse exclusivamente a la fabricación de azúcar de remolacha, le aconsejo que más vale que abandone el tema." Pese a esas palabras, acude al laboratorio de Liebig para aprender su metodología. Pero su influencia se debe a los libros de texto. En 1838 da a la imprenta *Lehrbuch der rationellen Praxis der landwirthschaftlichen Gewerbe*, que conocería seis ediciones. Dos tuvo el *Lehrbuch der Essigfabrikation*. Pero su manual más conocido fue el *Lehrbuch der Chemie*, en tres volúmenes; la primera edición de los dos iniciales ("Physikalische und theoretische Chemie" y "Anorganische Chemie") apareció en 1840; la primera del tercer volumen ("Organische Chemie"), en 1843. Este manual estaba basado en los *Elements of Chemistry* de Thomas Graham. El laboratorio, por fin, constituía para Otto el lugar "donde la química se piensa, se expone y se aprende a domeñar".

A finales de siglo, si nos dejamos guiar por *The age of the molecule*, observamos, clavada en la pared del laboratorio, la tabla periódica de Mendeleiev con su potencia predictiva de elementos inéditos, asentada la teoría atómica y determinados los pesos atómicos de la mayoría de los elementos. Se había descubierto que una de las estructuras químicas cruciales —la del benceno— era un anillo insólito, plano y hexaédrico. Los capítulos que reputamos modernos habían conocido en el siglo XIX una rápida expansión. Alfred Werner había mostrado que los metales podían enlazarse con grupos de átomos y formar compuestos de coordinación complejos. Para ofrecer una explicación cuantitativa se atendía a la velocidad de reacción (cinética) y los procesos energéticos implicados (termodinámica). Empezaban a develarse las relaciones entre electricidad y química (electroquímica); se refinaba la química analítica, fundada en métodos "húmedos" y el test de la llama.





Robert Robinson sintetizó el alcaloide tropinona, una molécula que tiene un anillo de siete lados con un doble enlace carbono-oxígeno (un grupo carbonilo) y un puente de átomo de nitrógeno a través del anillo. El quid de su trabajo estuvo en el análisis retrosintético: partir de la molécula natural e imaginar cómo puede llegar a formarse, reconstruyendo sus pasos

Por no hablar de la expansión de la química industrial. Uno de los campos más fecundos, el de los tintes sintéticos, ilustra la situación. William Henry Perkin, alumno de August Hofmann, buscaba obtener quinina a través de la oxidación de derivados de antraceno a partir de brea de alquitrán mineral. Ignoraba que la estructura del material de partida (aliltoluidina) y de la quinina no guardaban relación alguna. Le salió un cieno marrón. Pensó que le irían mejor las cosas con anilina, aislada a partir de alquitrán por Hofmann. Trabajando en el laboratorio que se había montado en su propia casa, Perkin logró un compuesto malva que envió a una firma de colorantes. Así nació el nuevo tinte, la malveína sintética.

Los descubrimientos de nuestro siglo obligan a reescribir los manuales. Ocurrió así con los compuestos de gases raros. Todavía en 1962 creíase que eran inertes los elementos del grupo de los gases raros —helio, neón, argón, criptón, xenón y radón— cuyas estructuras atómicas presentan capas electrónicas ocupadas y estables. Ese año Neil Bartlett sintetizó la molécula $O_2^+PtF_6$, razonando que, dado que la energía necesaria para arrancar un electrón de la molécula de oxígeno (O_2) era similar a la requerida para extraer del xenón un electrón, este elemento podría formar también enlaces químicos. Al mezclar xenón con hexafluoruro de platino (PtF_6) Bartlett obtuvo el primer compuesto de gas "inerte", $XePtF_6$.

Pero los resultados más tangibles de los adelantos químicos del siglo XX han sido los materiales sintéticos, en particular los plásticos ubicuos y los cristales líquidos. Constan los segundos de moléculas que muestran alguna clase de orden orientado como en el cristal, si bien pueden moverse con libertad como en un líquido. Las moléculas nuevas de los nuevos materiales poseen sorprendentes propiedades electrónicas y magnéticas. Abarcan óxidos de metales cuya resistencia cambia bruscamente en un campo magnético aplicado (magnetorresistencia colosal) y superconductores a altas temperaturas que pierden toda resistencia eléctrica por debajo de temperaturas del nitrógeno líquido.

La química molecular está gobernada por el enlace covalente. La química supramolecular, o "química allende la molécula", se ocupa del enlace intermolecular no covalente y de las entidades o especies resultantes. Jean Marie Lehn, uno de sus fundadores, expone su alcance en *Chimie Supramoléculaire*. En una suerte de sociología molecular, las interacciones electrostáticas, puentes de hidrógeno, fuerzas de van der Waals u otras interacciones no-covalentes definen el fundamento de los procesos altamente específicos de reconocimiento, de reacción, de transporte, de regulación, etc., que se producen en biología,

como la fijación de un substrato en una proteína receptora, las reacciones enzimáticas, la formación de complejos multiproteicos, la asociación inmunitaria antígeno-anticuerpo, la lectura, la traducción y la transcripción intermolecular del código genético, la regulación de la expresión de los genes por las proteínas fijadas al ADN, la penetración de un virus en una célula, la inducción de las señales por los neurotransmisores, el reconocimiento celular, etcétera.

La química supramolecular hunde sus raíces en la química orgánica, en la química de coordinación y los complejos metálico-ligando, en la química física y los estudios teóricos y experimentales de las interacciones, en la bioquímica y los procesos biológicos que están fundados sobre la fijación y el reconocimiento del sustrato, en la ciencia de materiales y las propiedades mecánicas de los sólidos.

Fue Paul Ehrlich quien advirtió que las moléculas no actúan si no se fijan y quien introdujo el concepto de receptor. Pero la fijación debe ser selectiva, como “la llave y la cerradura” según imagen feliz de Emil Fischer en 1894, que evoca la complementariedad geométrica sobre la cual descansa el reconocimiento molecular. Además, la fijación selectiva exige una interacción, una afinidad entre los partícipes, que remite a la idea de coordinación introducida por Alfred Werner. Con estos tres conceptos, fijación, reconocimiento y coordinación, quedan establecidos los fundamentos de la química supramolecular.

Las especies supramoleculares se caracterizan por la disposición espacial de sus componentes y por la naturaleza de los enlaces intermoleculares que las asocian. Su intensidad cubre un vasto dominio, de débil a medio en los puentes de hidrógeno, a fuerte o muy fuerte para la coordinación de iones metálicos. Sin embargo, las fuerzas intermoleculares son, en general, netamente más débiles que los enlaces covalentes, aunque las especies supramoleculares sean termodinámicamente menos estables, cinéticamente más lábiles y dinámicamente más flexibles que las moléculas.

En una supramolécula el receptor ρ se une al sustrato σ, donde el substrato representa los componentes menores que se pretende fijar. La fijación selectiva de un substrato específico a su receptor da la supramolécula $\rho\sigma$ y pone en marcha un proceso de reconocimiento molecular. Si, además de los sitios de fijación, el receptor porta también funciones reactivas, se puede efectuar una transformación química sobre el substrato y comportarse como un catalizador supramolecular. El reconocimiento molecular, la transformación y el transporte representan las funciones fundamentales de las especies supramoleculares. Se define el reconocimiento molecular como la energía y la información implicadas en la fijación y selección de un sustrato por un receptor molecular dado; puede implicar también una *función* específica. La información es una noción clave de la química supramolecular. De hecho se trata de la noción principal. La química supramolecular puede considerarse la ciencia de la información química o informática molecular.

De la química básica a la industrial. Pocos se han consagrado a ésta con la entrega con que lo ha hecho Ralph Landau, quien desde los años cuarenta trabajó en una empresa de ingeniería especializada que desarrolló varios procesos químicos innovadores todavía en uso y “en 1982 vendí mi participación en la empresa para volcarme en la academia, primero en la Universidad de Stanford y luego en la Escuela John Kennedy de Administración Pública de Harvard”. Landau es coautor de *Chemicals and Long-Term Economic Growth. Insights from the Chemical Industry*.

Desde que Perkin descubrió el primer tinte sintético, los compuestos orgánicos adquirieron un interés sinpar.



Como resultado de una mejor comprensión de los principios del mecanismo de las reacciones orgánicas, en los años cuarenta y cincuenta el campo de la síntesis orgánica llegó a su culminación. La estrella en ese momento fue el químico de Harvard Robert Burns Woodward, quien trajo una nueva dimensión a la síntesis orgánica

Clorofila-a

Primer esteroide sintetizado

Estricnina

(-)-Vitamina B_{12}

La química orgánica comienza con ingredientes que contienen hidrocarburos, es decir, carbón, petróleo y gas natural, que constituyen la espina dorsal de los productos resultantes. En el primer estadio del procesamiento, estas materias primas se refinan para producir, por ejemplo, benceno y etileno. En una etapa subsiguiente, se añaden cloro y oxígeno al esqueleto de hidrocarburos para dar a los compuestos las características deseadas. El producto final podrá ser fibra de nailon o de poliéster, un plástico o un fármaco. El esqueleto de hidrocarburos era aportado en un comienzo por el carbón.

Tras la ruina de la guerra, en 1925 Alemania creaba la compañía IG Farben. Un año después, Gran Bretaña la imitaba con Imperial Chemical Industries (ICI). En los Estados Unidos se fueron asociando distintas compañías y forjaron DuPont, Union Carbide, Allied Chemical y American Cynamid. IG Farben devolvió muy pronto a Alemania la primacía europea. Pero Estados Unidos tejía su emporio petrolífero, mientras la industria europea seguía dependiendo del carbón más que del petróleo. La segunda guerra volvió a arrasar buena parte de la industria alemana. La americana utilizaba ya productos petroquímicos para la fabricación de plásticos, fibras y otros. El sector químico es hoy el primero en Estados Unidos y el segundo en Europa.

En la industria, "innovación" no es sinónimo de invención o descubrimiento. La innovación designa el proceso en cuya virtud cualquier descubrimiento o invención se convierte en producto, proceso o servicio comerciales. Así, en el camino hacia las fibras sintéticas fueron innovaciones sucesivas el nailon, el poliéster y la fibra acrílica. Ciñámonos a la fibra de poliéster, que da cuenta del 38 por ciento del total de la producción de fibra sintética en Estados Unidos. El polímero que constituye la fibra de poliéster es tereftalato de polietileno. Rex Whinfield y J. T. Dickson observaron, en 1940, que la patente de DuPont sobre el nailon dejaba un hueco. El nailon es un polímero poliamídico; su tipo más conocido está formado a partir de un ácido dibásico y la diamina de hexametileno. Whinfield y Dickson exploraron si un ácido dibásico aromático podía salvar el escollo de la patente y adquirir otras propiedades. Descubrieron que sus polímeros tenían un alto punto de fusión y podían extenderse para constituir una buena fibra. El más simple de estos polímeros era tereftalato de polietileno.

Desde el mismo despegue de la química se cuestionó su estatuto epistemológico. ¿Era arte empírico o ciencia? ¿Tenía leyes de valor general? Representa una aproximación temprana *Hans Christian Oersted* y, una reflexión reciente, *Philosophers in the Laboratory*. Oersted, que estudió física y farmacia en la Universidad de Copenhague, ha pasado a la historia por el descubrimiento en 1820 de la inducción magnética de una corriente eléctrica. Ante sus alumnos colocó una aguja magnética debajo de un cable conductor; cuando se activó la corriente, la aguja se movió ligeramente. También se le reconoce haber obtenido el primer valor preciso de la compresibilidad del agua, en 1822.

Aunque todos sus escritos se redactaron después del *Traité élémentaire* de Lavoisier, se movió libremente entre la vieja y la nueva nomenclatura. Son sus lucubraciones teóricas un diálogo con Kant, el Romanticismo y la *Naturphilosophie*. En la clasificación general de las ciencias que aparece en *Fundamentos metafísicos de la ciencia natural*, Kant atribuye a la química el último lugar en importancia: "La química sólo es y podrá ser un arte sistemático o una doctrina experimental, nunca podrá denominarse en rigor ciencia, porque sus principios o fundamentos son en última instancia empíricos y no permiten ninguna representación *a priori* a través de la intuición; no hace en consecuencia inteligibles los fundamentos de los fenómenos químicos porque no resulta imposible aplicarle la matemática." De esa tesis discrepa Oersted. La enmendará el propio Kant en un escrito inacabado, *Transición de los fundamentos metafísicos de la ciencia natural a la física*, donde considera ya la química una ciencia real: "Toda la química pertenece a la física; la química es una parte de la física, no una mera transición de la metafísica a la física." Oersted defendía, además, que todas las ramas de la ciencia natural debían unificarse en una ciencia comprehensiva, universal, que se correspondería con la organización integrada de la naturaleza en su conjunto.

Leyó muy pronto las *Prolusiones ad chemiam saeculi decimi noni* de Jakob Joseph Winterl, donde éste explayaba su sistema altamente especulativo de química general; alternativo al de Lavoisier, se basaba en dos principios físicos fundamentales, Andronia y Thelike, que corresponderían a los dos principios de acidez y alcalinidad, así como a los de electricidad positiva y negativa y otras polaridades análogas de la naturaleza. Oersted, aunque mantenía sus reservas sobre los fundamentos empíricos y sobre la validez de la filosofía de Winterl, le prestó apoyo. Y ofreció un sumario del mismo en *Materiales para la química del siglo xix*. Pero, tras descubrir que fracasaba en su demostración experimental de los sistemas de Winterl y Johannes Ritter, ideó el suyo propio, que reposaba en una doctrina peculiar sobre la unidad de las fuerzas. Habría una ciencia general, de la que la química sería la parte fundada en la atracción y la repulsión.

La filosofía de la química hoy es deudora de la filosofía de la ciencia desarrollada en los decenios centrales de nuestro siglo. Reflexiona, pues, sobre conceptos, sintaxis de esos conceptos y leyes. ¿Derivan conceptos y leyes de la química de otros anteriores, físicos? El reduccionista sostiene que la estructura de una ciencia se basa en relaciones deductivas entre teorías y leyes de distintas disciplinas. Aquí, la química procedería o recibiría el marchamo científico de la física. Para el antirreduccionista, ante el fracaso cosechado en el intento de establecer relaciones deductivas, es obligado respetar zonas de autonomía, dotadas de una clase específica de problemas, unos procedimientos experimentales específicos y unos conceptos clave asimismo específicos.

En la defensa de la postura contra el reduccionismo se apela a la peculiaridad de las propiedades químicas de los elementos y de los compuestos. Distinguen entre "propiedades intrínsecas" y "propiedades inherentes", donde aquéllas son las que el sistema posee por su estructura y en todas las ocasiones, y éstas son las propiedades que vienen determinadas por relaciones (ejemplo de propiedad inherente es la de valencia, o capacidad de formar enlaces covalentes entre elementos). Además, la especificidad de la química se manifestaría en su alejamiento del modelo nomológico-deductivo, según el cual un fenómeno empírico —el *explanandum*— se aclara en términos del *explicans* constituido por un complejo de leyes naturales y ciertas condiciones iniciales. Si ese modelo sirviera para la química, la especificidad de esta disciplina debería reconducir a leyes específicas de la química. Pero la generalización que opera en química no es por leyes, sino por clases.

Luis Alonso

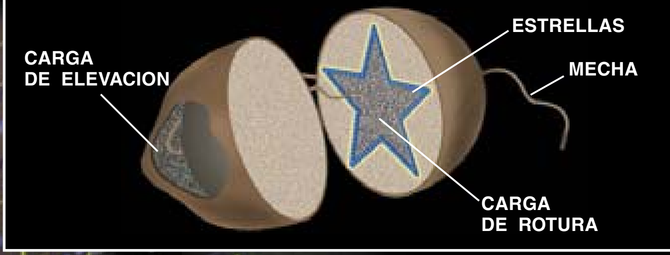
George R. Zambelli, Sr.

Fuegos artificiales

Seguramente ninguna otra rama de la química aplicada haya procurado a las gentes más motivos de asombro y diversión que los fuegos artificiales. En las exhibiciones modernas se hace uso del encendido electrónico controlado por ordenador y de mechas temporizadas para sincronizar con precisión los estallidos al ritmo de la música. Pero las espectaculares explosiones resultan de la combinación de pólvoras, resinas, gomas, papel y fibra en distintas formas ingeniosas (y a menudo secretas) que han cambiado notablemente poco pese a cinco siglos de experimentación pirotécnica.

MORTEROS

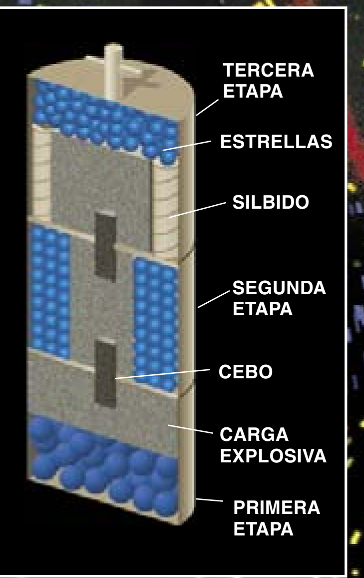
UNA RUTILANTE ESTRELLA DE CINCO PUNTAS, un corazón o un símbolo de la paz, brota con un estampido. Productos químicos granulados, llamados estrellas, se empaquetan en un molde de plástico relleno de pólvora de mina, estallando para salir de un cartucho esférico, cuyos huecos se rellenan con serrín o con salvado para asegurar que el conjunto conserve su forma durante el viaje.



TUBOS DE MORTERO, hechos de plástico de cloruro de polivinilo (CPV), se hincan en el suelo y se cargan con los cartuchos antes del espectáculo. Del tubo sale una mecha de gran longitud que conecta una bolsa de pólvora negra (hasta 170 gramos de ella para un cartucho de tres etapas y 15 cm de diámetro) a un "detonador" electrónico que enciende la carga de elevación mediante control por ordenador.

LOS FUEGOS ARTIFICIALES SILBANTES incluyen dentro del cartucho tubos de cartón llenos de perclorato potásico, liquidámbar y salicilato sódico, estando taponados en un extremo con arcilla. Al quemarse los productos químicos, el gas que emiten crea un silbido muy agudo.

UN CARTUCHO SENCILLO DE QUINCE CENTIMETROS puede realizar varias "etapas" o estallidos al elevarse hasta una altura de centenares de metros. Unos tubos duros rellenos de pólvora, que no son sino cebos, traspasan el fuego de una etapa a otra. Variando la cantidad de pólvora de los cebos puede ajustarse con precisión el retardo entre las fases, que puede ir de uno a ocho segundos.



LA CARGA EXPLOSIVA contenida dentro del cartucho enciende las "estrellas" esféricas, hechas a base de polvos metálicos, sales y adhesivos. Las estrellas pueden parpadear y cambiar de color mientras se consumen, gracias a que las sucesivas capas van desapareciendo y exponen otras de diferente composición.

Seguiremos explorando
los campos del conocimiento



LOS PELIGROS ESCONDIDOS DE *PFIESTERIA*, por JoAnn M. Burkholder

Este ser diminuto y unicelular ha acabado con la vida de millones de peces en los estuarios. Y sus toxinas han llegado al hombre. Tan dañino es, que sus efectos sutiles perduran durante años a través de la cadena trófica.

PESCADORES PALEOINDIOS DEL PERU, por Daniel H. Sandweiss, Asunción Cano, Bernardino Ojeda y José Roque

En la Quebrada de Jaguay, cercana a la costa oceánica, se han descubierto restos de actividad pesquera en los primeros momentos de la ocupación humana del Nuevo Mundo.

EL FUTURO DE LA COMPUTACION, por Michael L. Dertouzos

El Laboratorio de Ciencias de Cómputo del Instituto de Tecnología de Massachusetts está desarrollando una nueva infraestructura —el sistema Oxygen— para la industria de la información, que promete hacer realidad una visión largamente acariciada, la de lograr más haciendo menos.

HABLAR CON EL ORDENADOR, por Victor Zue

Las interfaces que funcionan con la voz pueden permitir en breve que los usuarios obtengan datos y den instrucciones sin mover un dedo.

CAMALEONES INFORMATICOS, por John V. Guttag

Los sistemas de comunicaciones que acometen misiones plurales se convertirán en los nexos de las futuras redes informáticas inalámbricas.

COMPUTACION FLEXIBLE, por Anant Agarwal

Uno de los principales motores del proyecto Oxygen es el micro Raw, cuyas conexiones internas son automáticamente reprogramables para distintas tareas.

DETECCION DE LA MASA DE LOS NEUTRINOS, por Edward Kearns, Takaaki Kajita y Yoji Totsuka

En las entrañas del monte Okenoyama un gigantesco detector ha captado las metamorfosis que los neutrinos sufren en medio de su camino, prueba palpable de que estas fantasmales partículas tienen masa.

EL SISTEMA DE DEFENSA ANTIMISILES, por George N. Lewis, Theodore A. Postol y John Pike

La inquietud acerca de países no fiables en posesión de armas nucleares ha hecho renacer el entusiasmo por un sistema defensivo contra misiles balísticos. Por desgracia, tal sistema es tan irrealizable y desaconsejable hoy como lo fue hace treinta años, por idéntica razón: la facilidad con que se burla.

EL DESARROLLO MORAL DE LOS NIÑOS, por William Damon

No basta con decirles a los niños lo que está bien y lo que está mal. Deben ellos ir ejercitándose en el cumplimiento de sus convicciones. A los padres compete ayudarles en ese empeño.

TRAS LA PISTA DE UN VIRUS, por W. Wayt Gibbs

Un virus inédito que asoló la Malasia rural, mató a más de 110 personas y forzó el sacrificio de un millón de cerdos, reveló la vulnerabilidad del mundo ante las nuevas enfermedades. Incluso los mayores esfuerzos de los mejores expertos son a veces insuficientes para impedirlas.

